



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**NÁVRH PODVOZKU MALÉHO DVOUMÍSTNÉHO
LETOUNU**

THE DESIGN OF THE LANDING GEAR OF THE SMALL TWO-SEAT AIRPLANE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Trojánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Vaněk, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Bc. Tomáš Trojánek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Stavba letadel
Vedoucí práce: **Ing. František Vaněk, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh podvozku malého dvoumístného letounu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte podvozek malého dvoumístného letounu dle příslušného stavebního předpisu. Proved'te konstrukční návrh a pevnostní kontrolu.

Cíle diplomové práce:

- posouzení možných variant z technického a ekonomického hlediska
- návrh konstrukce a uchycení podvoku
- výpočet zatížení podvozku
- pevnostní výpočet a kontrola konstrukce podvozku a jeho uchycení
- odpovídající výrobní dokumentace

Seznam doporučené literatury:

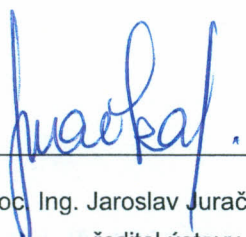
PAZMANY, L.: Landing gear design for light aircraft. San Diego, Calif.: Pazmany Aircraft Corp., 1986. ISBN 0961677708.

CURREY, N. S.: Aircraft landing gear design: principles and practices. Washington, D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1988. ISBN 0930403-41-X.

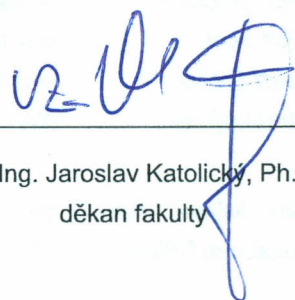
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 14. 11. 2017





doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá úpravou podvozku letounu za splnění podmínek předpisu CS-23, neboť stávající přistávací zařízení není možno v souladu s tímto předpisem certifikovat. V první řadě řeší, jaký typ podvozku je pro toto zadání optimální s ohledem na technickou a ekonomickou náročnost. Následně po vybrání vhodného typu podvozku s tlumičem se zabývá jeho návrhem a výpočtem zatížení. Poslední část řeší pevnostní kontrolu a následné úpravy vycházející právě z této kontroly.

ABSTRACT

The aim of this master thesis is modification of landing gear for accomplishment CS-23 regulation from that purpose, because landing gear in the use can't pass this type of certification. The first part examines the alternatives of landing gear with consideration optimal technical and economical difficulty. After finding optimal type of landing gear with shock absorber is there part of designing and computing the load. Last part of thesis is about stress analysis of whole concept and reconsidering final changes.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přistávací zařízení, příďový podvozek, hlavní podvozek, tlumič

KEYWORDS

Landing gear, nose landing gear, main landing gear, shock absorber

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TROJÁNEK, T. *Návrh podvozku malého dvoumístného letounu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Vaněk, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením vedoucího diplomové práce Ing. Františka Vaňka Ph.D. za použití uvedené literatury.

V Brně 21. května 2018

.....
Bc. Tomáš Trojánek

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Vaňkovi Ph.D. za vždy vstřícný přístup a cenné rady při tvorbě diplomové práce a celé mé rodině za dlouhodobou podporu při studiu.

Obsah

ÚVOD	7
1 TYPY KONSTRUKCÍ PODVOZKŮ	8
1.1 PRUŽINOVÝ PODVOZEK	8
1.2 TELESKOPICKÝ PODVOZEK.....	8
1.3 PÁKOVÝ PODVOZEK.....	9
2 TYPY KONSTRUKCÍ TLUMIČŮ	10
2.1 HYDROPNEUMATICKÝ TLUMIČ.....	10
2.2 HYDRAULICKÝ TLUMIČ	10
2.3 PÉROVÝ TLUMIČ S GUMOVÝMI BLOKY	10
3 POŽADAVKY NA PODVOZEK	11
4 STREAM TRAINER	12
4.1 PŘÍSTÁVACÍ ZAŘÍZENÍ.....	13
5 NÁVRH PODVOZKU	14
6 VÝPOČET POZEMNÍHO ZATÍŽENÍ DLE PŘEDPISU CS-23	16
6.1 STANOVENÍ KLESACÍ RYCHLOSTI	16
6.2 VÝPOČET NÁSOBKU SETRVAČNÝCH SIL.....	16
6.2.1 <i>Násobek zatížení pro případ současného dosednutí příďového a hlavního podvozku</i>	<i>16</i>
6.2.2 <i>Násobek zatížení pro případ dosednutí hlavního kola a příďového těsně nad zemí</i>	<i>17</i>
6.3 VODOROVNÉ PŘÍSTÁNÍ SE SKLONĚNÝMI REAKCEMI	18
6.4 VODOROVNÉ PŘÍSTÁNÍ S PŘÍĐOVÝM KOLEM TĚSNĚ NAD ZEMÍ.....	19
6.5 PŘÍSTÁNÍ S VELKÝM ÚHLEM PODÉLNÉHO SKLONU.....	19
6.6 BOČNÍ ZATÍŽENÍ PODVOZKU PŘI PŘÍSTÁNÍ	20
6.7 ZATÍŽENÍ PODVOZKU PŘI BRŽDĚNÍ	21
6.8 STATICKÉ ZATÍŽENÍ PODVOZKU	22
6.9 DODATEČNÉ ZATÍŽENÍ PŘÍĐOVÉHO PODVOZKU.....	22
6.10 PŘEHLED PROVOZNÍHO ZATÍŽENÍ PODVOZKU	23
7 NÁVRH TLUMIČE HLAVNÍHO PODVOZKU	24
7.1 ZÁKLADNÍ GEOMETRIE TLUMIČE HLAVNÍHO PODVOZKU	24
7.2 SÍLY V TLUMIČI HLAVNÍHO PODVOZKU	25
7.3 VÝPOČET PRŮTOČNÝCH PLOCH KATARAKTU TLUMIČE HLAVNÍHO PODVOZKU.....	27
8 NÁVRH TLUMIČE PŘÍĐOVÉHO PODVOZKU	32
9 KONSTRUKČNÍ NÁVRH HLAVNÍHO PODVOZKU	34
9.1 PODVOZKOVÁ NOHA	34
9.2 VIDLICE	35
9.3 TLUMIČ	36
9.4 ZÁVĚS TLUMIČE.....	37
10 KONSTRUKČNÍ NÁVRH PŘÍĐOVÉHO PODVOZKU.....	38
10.1 NOHA PŘÍĐOVÉHO PODVOZKU	38
10.2 TLUMIČ PŘÍĐOVÉHO PODVOZKU	39
10.3 NŮŽKY PODVOZKU	40
11 PEVNOSTNÍ KONTROLA HLAVNÍHO PODVOZKU.....	41
11.1 VIDLICE	41

11.2	SESTAVA.....	43
11.3	ZÁVĚS.....	44
11.4	UNAŠEČ.....	45
11.5	TĚLO TLUMIČE.....	46
11.6	PÍSTNÍ TYČ.....	47
11.7	ČEP KLOUBOVÉ HLAVICE.....	48
11.8	ČEP SPOJE NOHY A VIDLICE.....	49
12	PEVNOSTNÍ KONTROLA PŘÍĐOVÉHO PODVOZKU.....	51
12.1	ČEP SPOJE NOHY A DRŽÁKU.....	52
ZÁVĚR.....		54
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....		55
SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN.....		57
SEZNAM OBRÁZKŮ.....		59
SEZNAM TABULEK.....		61
SEZNAM PŘÍLOH.....		62

Úvod

Přistávací zařízení je taková část draku letadla, která zajišťuje přistání, vzlet, pojíždění a stání letounu na vyhrazené ploše. Jeho nedílnou funkcí je zachycení zatížení, které na letoun působí při těchto čtyřech vyjmenovaných kategoriích. Z tohoto důvodu musí být vybaven mechanismem pro zachycení rázů, který má za následek přenesení a částečné utlumení zatížení do konstrukce trupu. V dnešní době vývoje lehkých letounů se v této kategorii klade důraz především na co nejnižší výrobní náklady, nejmenší hmotnost a zároveň na maximální životnost zařízení.

Díky své náročnosti tvoří až čtyři procenta celkové ceny letadla a až sedm procent jeho prázdné hmotnosti. Podvozek je považován za jednu z nejvíce komplikovaných částí letounu. A proto jeho návrh vyžaduje znalosti konstruktéra jak z mechaniky, kinematiky a pevnosti tuhých těles, tak také z hydraulických a elektrických systémů.

Současná konstrukce přistávacího zařízení ultralehkého letounu, ze kterého TL-Trainer vychází, není vhodná pro tuto verzi s navýšenou maximální vzletovou hmotností na 800 kg. Hlavní požadavek je nalézt finančně přijatelnou úpravu přistávacího zařízení, která bude vhodná pro letoun navržený dle předpisu CS-23.

1 Typy konstrukcí podvozků

Tato kategorie je ve většině případů dělena podle způsobu tlumení podvozkové nohy. Cílem je dosažení optimálního tlumení pro daný typ letounu [1], [2].

1.1 Pružinový podvozek

Jedná se o typ přistávacího zařízení, které nevyužívá přídavného zařízení pro zvýšení tlumení. Jediným prvkem, který zvyšuje tlumící energii, je samotný podvozek. Tento typ díky své konstrukci a využití vhodné pneumatiky zajistí dostatečný útlum energie přistávacího rázu letounu. Základním materiálem pro výrobu tohoto podvozku jsou uhlíková a skelná vlákna, která jsou poskládána ve většině vrstev pouze v jednom směru-UD (United direction). Jeho jednodušší konstrukce zajišťuje celkově nižší hmotnost celé soustavy.



Obrázek 1 GB1 s pružinovým podvozkem [3]

1.2 Teleskopický podvozek

Jedná se o typ přistávacího zařízení, který využívá tlumiče uložené přímo v ose podvozku. Osa kola je v tomto případě pevně spojena s pístnicí a koná s ní posuvný pohyb. Pro zamezení samovolného otáčení kolem osy podvozku musí být vybaven mechanismem (nůžky), který spojí podvozkovou nohu s tlumičem podvozku a zároveň umožní translační pohyb ve směru osy tlumiče.

V tomto případě se nachází tlumič výhradně v ose nohy přistávacího zařízení a k absorpci tlumících rázů může využívat stlačený plyn, ocelové pružiny nebo gumové disky. Obecně se ale využívá kombinace oleje za účelem absorpce rázu a stlačeného plynu (vzduchu) pro obnovení tlumícího efektu.



Obrázek 2 Teleskopický podvozek s nůžkovým mechanismem [4]

1.3 Pákový podvozek

Pákový podvozek byl poprvé patentováno v roce 1911, avšak nynější podobu získal až v roce 1939 britským inženýrem Georgem H. Dowty. Následně se tento typ začal využívat u nových designů lehkých letadel. Pákový podvozek bude ve většině případů těžší, nicméně při použití gumových tlumicích bloků bude výrobně i cenově méně náročný. Díky své konstrukci je zde umožněno využití kratších tlumičů, což je u lehkých letounů výhodné pro připevnění k dolnoplošnému typu letadel.



Obrázek 3 Pákový podvozek [5]

2 Typy konstrukcí tlumičů

Tlumič podvozku se společně s pneumatikou při práci pružně deformují. U jiného než pružinového podvozku dochází ke stlačení tlumiče a promáčknutí pneumatiky. Tímto jevem je zachycena energie a přeměněna v práci. Při pohybu tlumiče dochází také k přeměně této energie v teplo, zejména díky tření kovových prvků (těsnících kroužků) nebo kapaliny o průchodné otvory tlumiče.

Vlastnosti pružení a tlumení tlumícího zařízení se odvíjejí od jeho konstrukčního uspořádání. Nejvíce používané tlumiče jsou díky své výrazné účinnosti hydropneumatické a hydraulické. U letounů, kde hraje výraznou roli cena, se využívají tlumiče gumové a pérové [6].

2.1 Hydropneumatický tlumič

U tohoto typu tlumiče dochází k pohlcení energie průtokem kapaliny otvory vnitřního válce a stlačením plynu. Kapalina je v tomto případě tlumící prvek a díky maximálním tlakům je považována za nestlačitelnou. Plyn se v průběhu přistávacího manévru stlačuje, akumuluje energii a následně vrací tlumič do polohy odpovídající zatížení při pojíždění nebo stání letounu. V hydropneumatickém tlumiči se pro plnění využívají plyny jako jsou vzduch a dusík. Tlumící kapalinou je ve většině případů liho-glycerinová směs nebo speciální olej o dané viskozitě.

2.2 Hydraulický tlumič

U tohoto typu tlumiče dochází k pohlcení kinetické energie průtokem kapaliny otvory vnitřního válce a zároveň k jejímu stlačení díky maximálním tlakům, které jsou větší než u hydropneumatického tlumiče. Kapalina má v tomto případě jak tlumící, tak i pružící charakter.

2.3 Pérový tlumič s gumovými bloky

Tento typ tlumiče využívá při zatížení pružných vlastností pružiny a tlumících gumových bloků. Jedná se o jednoduchou konstrukci, která je na druhou stranu vyvážena slabší tlumící účinností.

3 Požadavky na podvozek

Hlavní úlohou podvozku je zamezení kontaktu ostatních částí letounu se zemí. Zatahovací přístávací zařízení je využito ve většině případů použití letounu kromě samotného letu. Pevný podvozek ovlivňuje vlastnosti letounu i za letu, tudíž ve všech možných případech. Z tohoto důvodu jsou na přístávací zařízení kladeny požadavky [7].

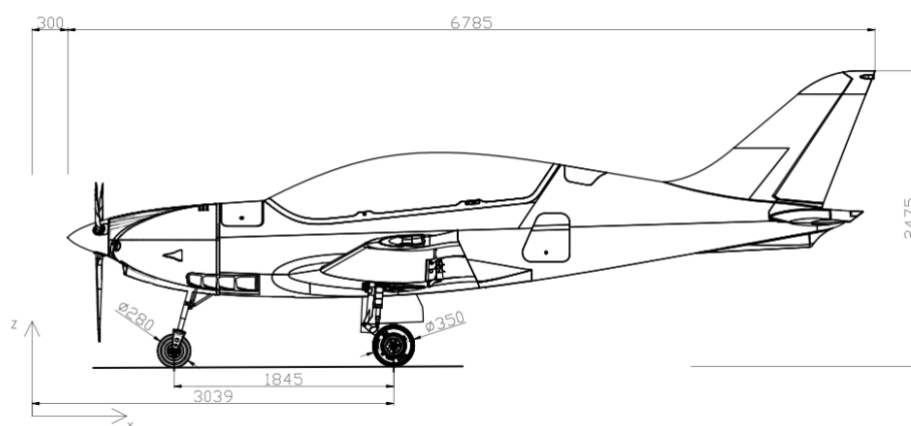
- Podle CS 23.925 musí podvozek zajistit dostatečnou vzdálenost mezi vrtulí a zemí při statickém zatížení nejméně 180 mm i v případě nejnepříznivější konfigurace.
- Podvozek musí být navržen tak, aby byla zajištěna dostatečná stabilita (statická, dynamická) a ovladatelnost podvozku při pojíždění na zemi.
- Docílení minimálního aerodynamického odporu vyčnívajících částí podvozku. Cílem je zakrytí všech částí podvozku do konstrukce letounu pomocí aerodynamických krytů.
- Minimální hmotnost při dostatečné pevnosti, tuhosti, životnosti a spolehlivosti.
- Dostatečné tlumení a odezva na řízení.
- Účinný brzdový systém.
- Zajištění uchování geometrie podvozku i při plném propružení.
- Nízká cena
- Jednoduchá údržba
- U zatahovacích podvozků
 - a. Doba zatáhnutí a vytáhnutí u menších letadel do 8-12 s.
 - b. V případě poruchy možnost nouzového ovládání zatahovacího mechanismu.
 - c. Signalizace uzamknutí mechanismu v obou krajních polohách v kabině letounu.

4 Stream Trainer

Trainer vychází z předlohy Stream, což je celokompozitový letoun kategorie UL navrhnutý firmou TL-ULTRALIGHT určený pro rekreační létání. Jedná se o dvoumístný letoun dolnoplošné koncepce s tandemovým uspořádáním sedaček a zatahovacím podvozkem příďového typu. Nynější verze Trainer je navrhována na vzletovou hmotnost 800 kg dle předpisu CS-23 s pohonnou jednotkou Rotax 912 ULS [8].



Obrázek 4 TL-ULTRALIGHT Stream



Obrázek 5 2D pohled letounu Stream

Tabulka 1 Základní parametry letounu Trainer

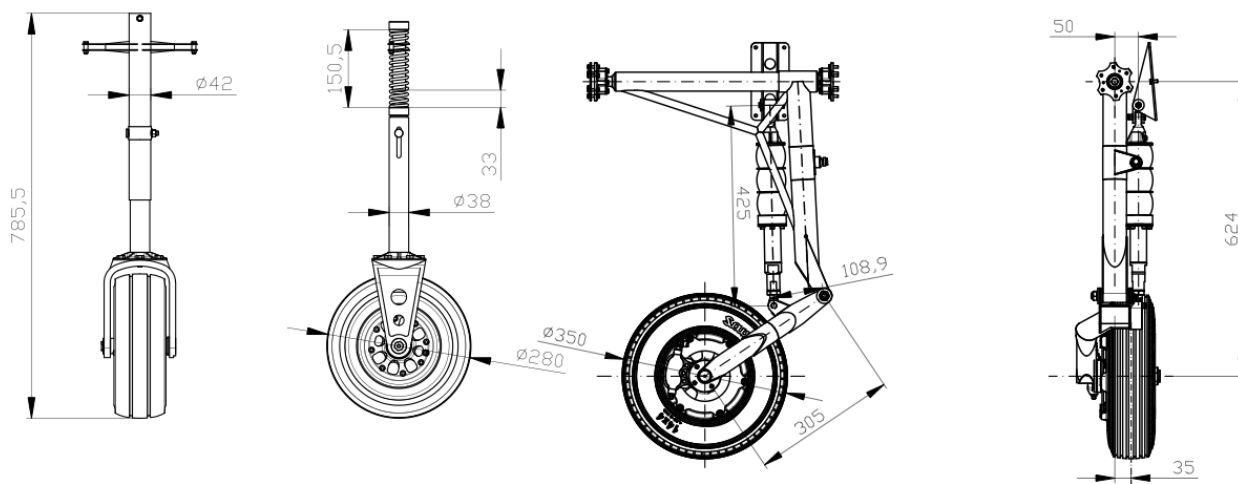
Maximální vzletová hmotnost	m	800	[kg]
Hmotnost prázdného letounu	-	375-400	[kg]
Max. hmotnost posádky	-	200	
Rozsah polohy těžiště (% c_{sat})	-	15-35 %	
Rozpětí	-	9,000	[m]
Délka	-	6,7845	[m]
Výška	-	2,475	[m]
Plocha křídla	S	9,962	[m ²]
Hloubka střední aerodynamické tělivy	C_{sat}	1,199	[m]

4.1 Přístávací zařízení

U UL koncepce je hlavní podvozek pákového typu odpružen pomocí tlumičů z polyuretanových bloků umožňující stlačení 0,04 m. Předový teleskopický podvozek je odpružen pomocí ocelové pružiny se stlačením 0,033 m. Obě hlavní kola jsou bržděná, přičemž předový podvozek je říditelný pedály nožního řízení. Na hlavním podvozku jsou použita kola 355x135 a na předovém 280x100. Podvozek je zasouván pomocí hydraulického systému do šachet v centroplánu a přední části trupu. Z hlediska bezpečnosti je tento systém vybaven záložní hydraulickou pumpou.

Tabulka 2 Základní parametry původního přístávacího zařízení

Rozvor	-	1,800	[m]
Rozchod kol hlavního podvozku	-	1,950	[m]
Průměr hlavního kola	d_h	0,355	[m]
Průměr předového kola	d_p	0,280	[m]
Max. stlačení kola hlavního podvozku	-	0,081	[m]
Max. stlačení kola předového podvozku	-	0,057	[m]
Celkové propružení hlavního podvozku	-	0,199	[m]
Celkové propružení předového podvozku	-	0,090	[m]



Obrázek 6 Původní přístávací zařízení

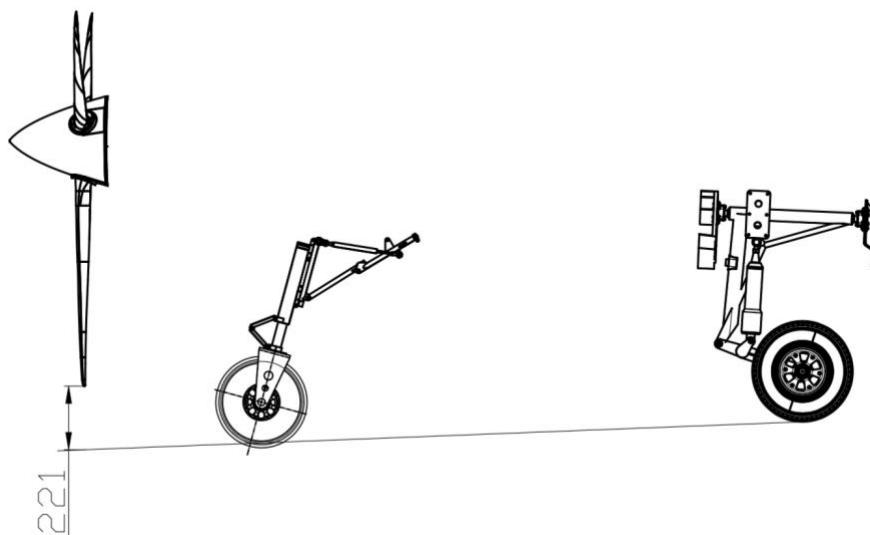
5 Návrh podvozku

V prvé řadě je nezbytné zvolit typ tlumiče přistávacího zařízení. Z důvodu navýšení vzletové hmotnosti, stávající řešení nesplňuje požadavky certifikace, a proto byl i přes vyšší konstrukční i finanční náročnost zvolen účinnější tlumič hydropneumatický. Tato volba byla zvolena po odborné konzultaci s vedoucím práce. Díky univerzálnímu uložení původního tlumiče s gumovými bloky je možná snadná záměna tlumičů při zachování původní kinematiky pákového mechanismu hlavního podvozku [7], [9].

Při řešení zdvihů hydraulických tlumičů u letounu s předovým typem podvozku se musí dbát na minimální vzdálenost vrtule od země při kombinaci nejnepříznivější hmotnostní konfigurace a nastavení listu vrtule. Tato vzdálenost musí být nejméně 18 cm při staticky stlačeném přistávacím zařízení v normální vodorovné vzletové nebo pojízďecí poloze podle toho, která z těchto případů je kritičtější. Mimoto musí být prokázána spolehlivá vzdálenost při plně vypuštěné pneumatice předového podvozku a na doraz stlačené příslušné podvozkové nohy.

Tabulka 3 Navrhované základní parametry přistávacího zařízení

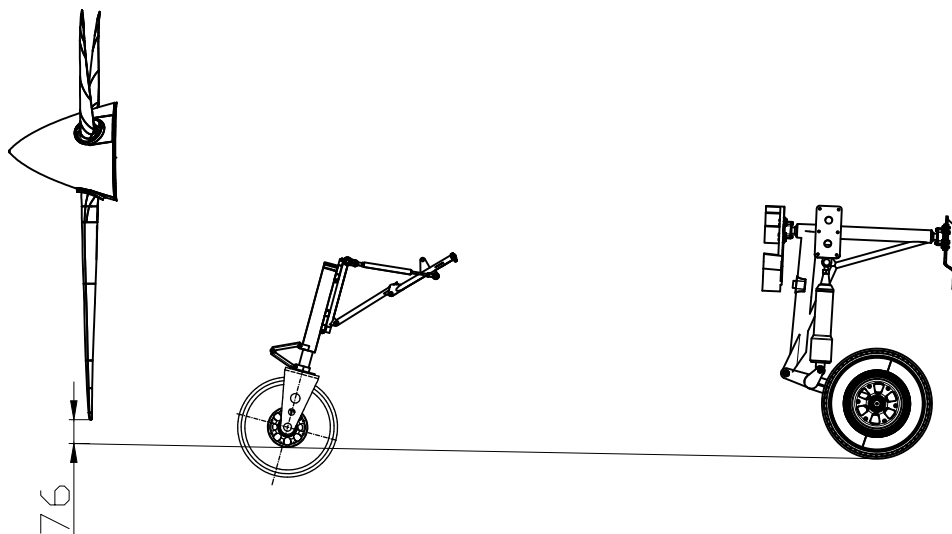
Max. stlačení tlumiče hlavního podvozku	65	[mm]
Max. stlačení tlumiče předového podvozku	70	[mm]



Obrázek 7 Kontrola vzdálenosti vrtule od země při staticky stlačeném podvozku

Návrh podvozku

Kontrola minimální vzdálenosti vrtule od země při staticky stlačeném tlumiči hlavního kola společně s předovým tlumičem při maximálním stlačení a minimální tloušťkou pneumatiky.



Obrázek 8 Kontrola vzdálenosti vrtule od země při prázdné pneumatice a naplno stlačeném předovém tlumiči



Obrázek 9 Výsledný 3D návrh podvozku

6 Výpočet pozemního zatížení dle předpisu CS-23

Pokud je známa kinematika podvozku společně s maximálním vertikálním posunem kol, je dalším krokem návrhu přistávacího zařízení vyšetření zatížení působící na hlavní a příďový podvozek dle daného předpisu. Následně lze jednotlivé části navrhnout s požadovaným násobkem bezpečnosti. V této kapitole bylo čerpáno ze stavebního předpisu CS-23 [7], [9], [10].

6.1 Stanovení klesací rychlosti

V této části je výsledný násobek nárazových sil řešen dle CS 23.473 Podmínky a předpoklady pozemního zatížení. Zvolený násobek nesmí být menší než násobek vypočítaný při rychlosti klesání v_y , kde jsou vstupní hodnoty přepočítány do anglo-amerických jednotek.

$$M = M_{TOW} = 800kg = 1763,7lb \quad (6.1)$$

$$S = 9,962m^2 = 107,23ft^2 \quad (6.2)$$

Vypočítaná klesací rychlost se má dle předpisu pohybovat v intervalu od 2,1 m/s do 3 m/s.

$$v_y = 4,4 \sqrt[4]{\frac{M}{S}} = 8,86 \frac{ft}{s} = 2,7 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (6.3)$$

6.2 Výpočet násobku setrvačných sil

Násobek setrvačných sil je definován jako poměr vzdušných sil vůči tíze letounu. Při výpočtu násobku se vychází ze zákona zachování energie. Část celkové energie je pohlcena přistávacím zařízením a část energie vztlakovou silou vyvozenou na křídle letounu. Pro vodorovná přistání se rozlišuje případ, kdy příďový podvozek dosedá současně s hlavním a kdy dosedá nejprve hlavní podvozek a příďový je těsně nad zemí. Pro tyto případy je potřeba vyšetřit odpovídající násobky setrvačných sil.

6.2.1 Násobek zatížení pro případ současného dosednutí příďového a hlavního podvozku

Tento případ je rozhodující pro příďový podvozek. Z tohoto důvodu se uvažuje největší zatížení při přední centráži s maximální hmotností. Pomocí geometrie navrženého podvozku bylo odhadnuto, že při maximálním stlačení hlavního a příďového podvozku je vertikální posun těžiště $d_1=0,22$ m při relativním stlačení pneumatik $d_{1k}=0,05$ m a pohybu os kol $d_{1t}=0,17$ m.

Kinetická energie přistávacího rázu:

$$E_K = \frac{1}{2}mv_y^2 \quad [J] \quad (6.4)$$

Výpočet pozemního zatížení

U výpočtu potenciální energie je uvažováno, že 2/3 celkové tíhy letounu je převzato vztlakem letounu:

$$E_P = \frac{1}{3} mgd_1 [J] \quad (6.5)$$

Celková energie:

$$E_C = \frac{1}{2} (E_K + E_P) [J] \quad (6.6)$$

Provozní násobek zatížení reakcí od země při účinnosti tlumiče $\eta_t=0,8$ a pneumatiky $\eta_k=0,45$:

$$R_Y = \frac{E_C}{\eta_t d_t + \eta_k d_k} [N] \quad (6.7)$$

$$n_{1,Z} = \frac{2R_Y}{mg} = \frac{\frac{1}{3}d_1 + \frac{1v_y^2}{2g}}{\eta_t d_{1t} + \eta_k d_{1k}} = 2,8 \quad (6.8)$$

Provozní násobek setrvačných sil:

$$n_{1,S} = n_{1,Z} + \frac{2}{3} = 3,47 \quad (6.9)$$

6.2.2 Násobek zatížení pro případ dosednutí hlavního kola a předového těsně nad zemí

Z geometrie navrženého podvozku je stanovena hodnota vertikálního posunu hlavního podvozku při maximálním stlačení na $d_2=0,268\text{m}$. Stlačení pneumatiky je $d_{2k}=0,081\text{m}$ a pohyb osy kola $d_{2t}=0,187\text{m}$.

Provozní násobek zatížení reakcí od země:

$$n_{2,Z} = \frac{2R_Y}{mg} = \frac{\frac{1}{3}d_2 + \frac{1v_y^2}{2g}}{\eta_t d_{2t} + \eta_k d_{2k}} = 2,48 \quad (6.10)$$

Provozní násobek setrvačných sil:

$$n_{2,S} = n_{2,Z} + \frac{2}{3} = 3,17 \quad (6.11)$$

6.3 Vodorovné přistání se skloněnými reakcemi

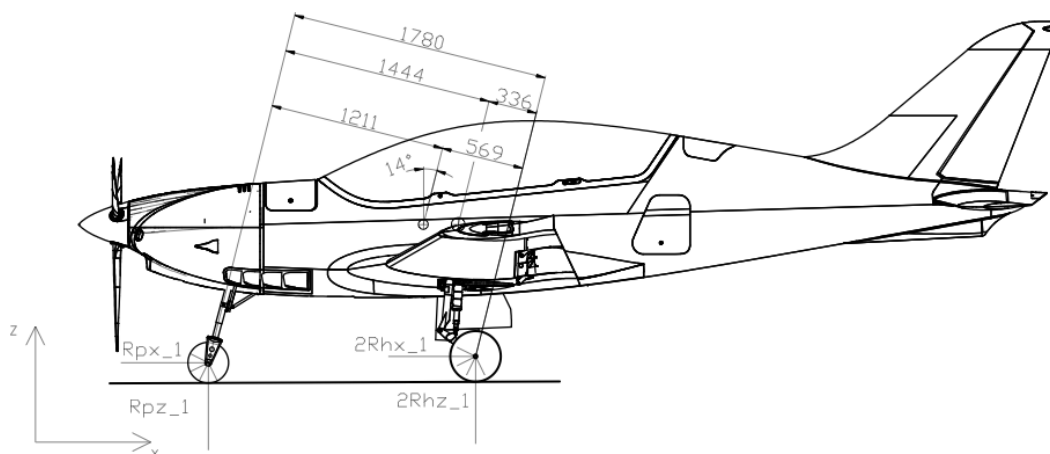
V tomto případě letoun dosedá na oba podvozky současně. Při výpočtu se vychází z CS 23.479 (a) (2) (i) a je zde použit koeficient $K=0,25$ ($\arctg K=14^\circ$). U vodorovného zatížení nesmí být reakce menší jak 25% svislé složky a dochází k zanedbání vlivu vztlaku křídla.

$$R_{pz_1} = (n_{1,s} - \frac{2}{3})mg \frac{b}{c} \quad (6.12)$$

$$R_{px_1} = Kn_{1,s}mg \frac{b}{c} \quad (6.13)$$

$$R_{hz_1} = \frac{(n_{1,s} - \frac{2}{3})mg \frac{a}{c}}{2} \quad (6.14)$$

$$R_{hx_1} = \frac{Kn_{1,s}mg \frac{a}{c}}{2} \quad (6.15)$$



Obrázek 10 Vodorovné přistání se skloněnými reakcemi

Tabulka 4 Výsledné síly pro případ vodorovného přistání se skloněnými reakcemi

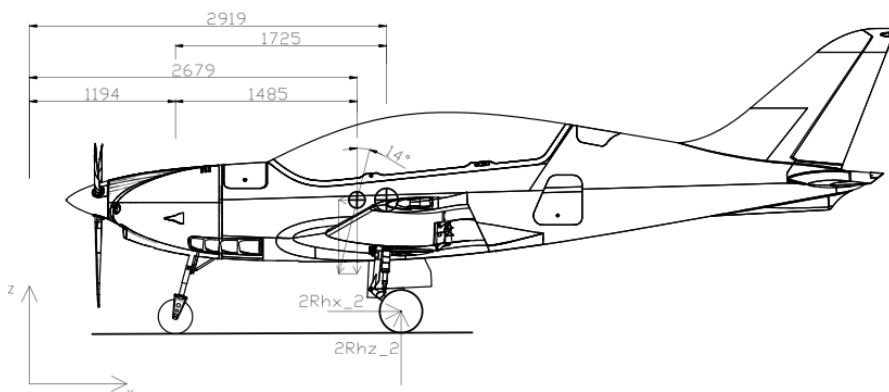
1	m	$n_{1,s}$	a	b	c	R_{pz_1}	R_{px_1}	R_{hz_1}	R_{hx_1}
	[kg]	[-]	[m]	[m]	[m]	[N]	[N]	[N]	[N]
Rf_1 (15% csat)	800	3,47	1,211	0,336	1,78	7035	2177	7486	2316
Rr_1 (35% csat)	800	3,47	1,444	0,569	1,78	4154	1285	8926	2762

6.4 Vodorovné přistání s příďovým kolem těsně nad zemí

Letoun přistává pouze na hlavní podvozek, při dotyku hlavního podvozku se zemí je reakce do příďového podvozku nulová. Při výpočtu se vychází z CS 23.479 (a) (2) (ii) a je zde použit koeficient $K=0,25$ ($\arctg K=14^\circ$).

$$Rh_{z_2} = \frac{(n_{2,s} - \frac{2}{3})mg}{2} \quad (6.16)$$

$$Rh_{x_2} = \frac{Kn_{2,s}mg}{2} \quad (6.17)$$



Obrázek 11 Reakce při vodorovném přistání s příďovým kolem těsně nad zemí

Tabulka 5 Výsledné reakce pro případ vodorovného přistání s příďovým kolem těsně nad zemí

2	m	$n_{2,s}$	K	Rh_{z_2}	Rh_{x_2}
	[kg]	[-]	[-]	[N]	[N]
Rf_2 (15% csat)	800	3,17	0,25	9734	3087
Rr_2 (35% csat)	800	3,17	0,25	9734	3087

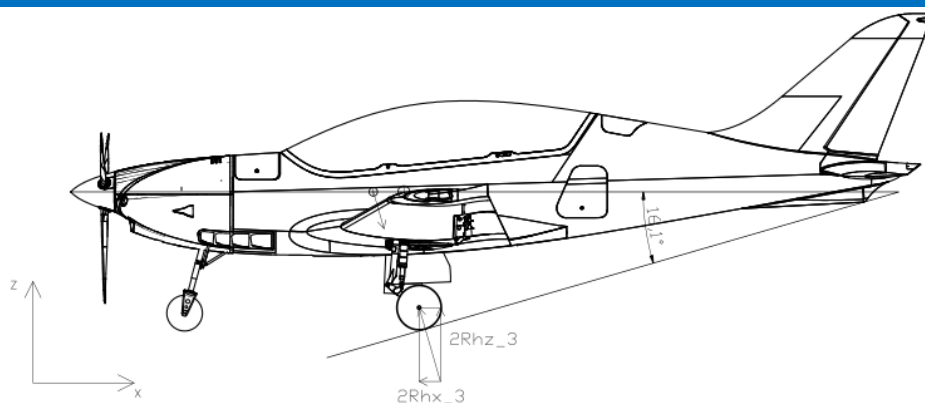
6.5 Přistání s velkým úhlem podélného sklonu

Letoun přistává pouze na hlavní podvozek. Dle předpisu CS 23.481 se předpokládají dvě možné polohy přistání. Volí se poloha přetažení nebo maximální úhel dovolující jistou světlost jakékoliv části letounu od země. Z geometrie byl odečten maximální možný úhel $\beta=16,1^\circ$.

$$Rh_3 = \frac{(n_{2,s} - \frac{2}{3})mg}{2} \quad (6.18)$$

$$Rh_{z_3} = Rh_3 \cos(16,1^\circ) \quad (6.19)$$

$$Rh_{x_3} = Rh_3 \sin(16,1^\circ) \quad (6.20)$$



Obrázek 12 Reakce při přistání s velkým úhlem podélného sklonu

Tabulka 6 Výsledné reakce pro případ přistání s velkým úhlem podélného sklonu

3	m	$n_{2,S}$	Rh_3	Rhz_3	Rhx_3
	[kg]	[-]	[N]	[N]	[N]
Rf_3 (15% csat)	800	3,17	9734	9352	2699
Rr_3 (35% csat)	800	3,17	9734	9352	2699

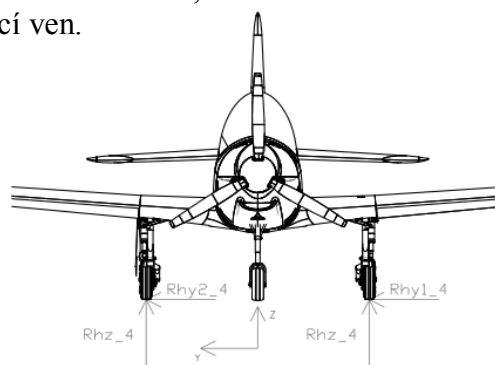
6.6 Boční zatížení podvozku při přistání

Letoun se v tomto případě nachází ve vodorovné poloze a dotýká se pouze hlavním podvozkem. Zatížení ve vodorovném směru vzniká při přistání s bočním poryvem nebo při změně směru při pojíždění. Dle předpisu CS 23.483 má provozní násobek svislého zatížení v těžišti letounu hodnotu 1,33. U bočního zatížení je tato hodnota 0,83 a dále se dělí do podvozkových noh na 0,5 působící dovnitř a 0,33 působící ven.

$$Rh_{z_4} = \frac{n_z mg}{2} \quad (6.21)$$

$$Rhy_{1,4} = n_{0,5} mg \quad (6.22)$$

$$Rhy_{2,4} = n_{0,33} mg \quad (6.23)$$



Obrázek 13 Reakce při bočním zatížení při přistání

Tabulka 7 Výsledné reakce pro případ bočního zatížení podvozku při přistání

4	m	n_z	Rhz_4	Rhy1_4 ($n_{0,5}$)	Rhy2_4 ($n_{0,33}$)
	[kg]	[-]	[N]	[N]	[N]
	800	1,33	5219	3924	2590

Výpočet pozemního zatížení

6.7 Zatížení podvozku při brždění

Letoun se v tomto případě nachází v poloze odpovídající vodorovnému přistání. Dle předpisu CS 23.493 se uvažuje několik podmínek. Během brždění při pojíždění dochází ke statickému stlačení tlumiče a pneumatiky. Provozní násobek pro svislou složku zatížení je stanoven na hodnotu 1,33. V případě odporové složky, která vzniká třením mezi pneumatikou a zemí, je hodnota násobku 0,8.

Základní vztahy:

$$R_{pz_5} = \frac{2Rh_{x_5}h + 1,33mg(c - a)}{c} \quad (6.24)$$

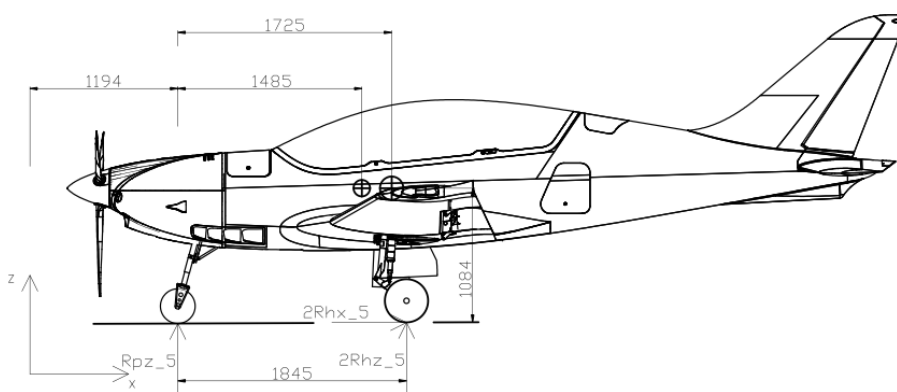
$$2Rhz_5 + R_{pz_5} = 1,33mg \quad (6.25)$$

$$R_{px_5} = 0,8Rhz_5 \quad (6.26)$$

Odvozené vztahy:

$$R_{pz_5} = \frac{1,33mg(0,8h + c - a)}{c + 0,8h} \quad (6.27)$$

$$Rhz_5 = \frac{1,33mg - R_{pz_5}}{2} \quad (6.28)$$



Obrázek 14 Reakce podvozku při brždění

Tabulka 8 Výsledné reakce pro případ zatížení podvozku při brždění

5	m [kg]	n (z) [-]	n (x) [-]	a [m]	c [m]	h [m]	R _{pz_5} [N]	R _{hz_5} [N]	R _{hx_5} [N]
Rf_5 (15% csat)	800	1,33	0,8	1,485	1,845	1,084	4723	2858	2286
Rr_5 (35% csat)	800	1,33	0,8	1,725	1,845	1,084	3792	3319	2655

6.8 Statické zatížení podvozku

Při statické poloze letounu dochází ke vzniku statických reakcí do podvozku. Součet zatížení od všech noh podvozku bude stejný jako celková hmotnost letounu.

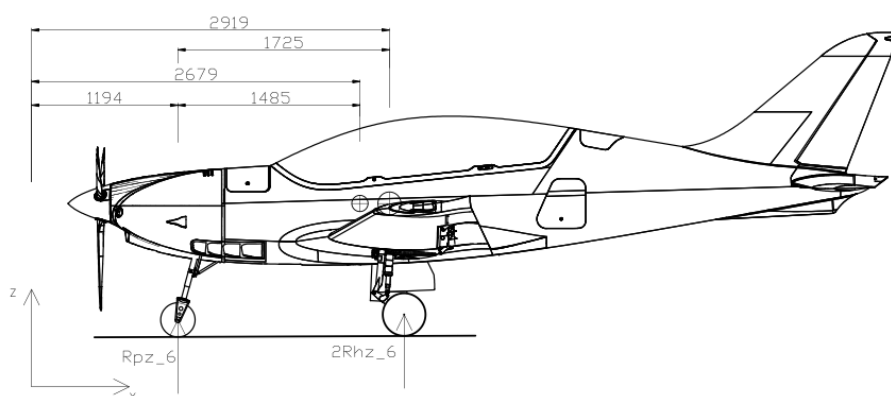
$$G = R_{pz_6} + 2R_{hz_6} \quad (6.29)$$

Reakce na jedno kolo hlavního podvozku:

$$R_{hz_6} = 0,5G \frac{a}{c} \quad (6.30)$$

Reakce na kolo příďového podvozku:

$$R_{pz_6} = G - 2R_{hz_6} \quad (6.31)$$



Obrázek 15 Reakce při statickém zatížení podvozku

Tabulka 9 Výsledné reakce pro případ statického zatížení podvozku při maximální a minimální hmotnosti letounu

6	m [kg]	a [m]	c [m]	R _{pz_6} [N]	R _{hz_6} [N]
R _{f_6} (15% csat)	800	1,485	1,845	1531	3158
R _{r_6} (35% csat)	800	1,725	1,845	510	3669
R _{f_6_min} (15% csat)	460	1,485	1,845	880	1816
R _{r_6_min} (35% csat)	460	1,725	1,845	294	2110

6.9 Dodatečné zatížení příďového podvozku

Dle předpisu CS 23.499 se pro stanovení pozemního zatížení příďového podvozku předpokládá, že tlumič a kolo jsou stlačeny staticky za těchto podmínek:

- Při zatížení směrem dozadu musí být provozní složky síly v ose kola:
 - Svislá složka 2,25 násobek statického zatížení kola
 - Odporová složka 0,8 násobek svislého zatížení.
- Při zatížení směrem dopředu musí být provozní složky síly v ose kola:
 - Svislá složka 2,25 násobek statického zatížení kola.
 - Dopředná složka 0,4 násobek svislého zatížení.

Výpočet pozemního zatížení

- c) Při bočním zatížení musí být složky provozní síly při dotyku se zemí následující:
- Svislá složka 2,25 násobek statického zatížení kola.
 - Boční složka 0,7 násobek svislého zatížení.

Tabulka 10 Výsledné reakce pro dodatečné zatížení příďového podvozku

7	m [kg]	Rpz_a,7 [N]	Rpx_a,7 [N]	Rpz_b,7 [N]	Rpx_b,7 [N]	Rpz_c,7 [N]	Rpy_c,7 [N]
Rf_7 (15% c_{sat})	800	3446	2756	3446	-1378	3446	2412
Rr_7 (35% c_{sat})	800	1149	919	1149	-459	1149	804

6.10 Přehled provozního zatížení podvozku

Tabulka 11 Souhrn všech případů zatížení hlavního podvozku

Hlavní podvozek	centráž [% c_{sat}]	Rhz [N]	Rhy [N]	Rhx [N]
Vodorovné přistání se skloněnými reakcemi	35	8926	-	2762
Vodorovné přistání s příď. kolem těsně nad zemí	15,35	9734	-	3087
Přistání s velkým úhlem podélného sklonu	15,35	9352	-	2699
Boční zatížení podvozku při přistání	15,35	5219	3924 2589	-
Zatížení podvozku při brždění	35	3319	-	2655

Tabulka 12 Souhrn všech případů zatížení příďového podvozku

Příďový podvozek	Rpz [N]	Rpy [N]	Rpx [N]
Vodorovné přistání se skloněnými reakcemi	7035	-	2177
Zatížení podvozku při brždění	4723	-	-
a	3446	-	2757
Dodatečné podmínky b	3446	-	-1378
c	3446	2412	-

7 Návrh tlumiče hlavního podvozku

Výpočet hydraulicko-pneumatického tlumiče se skládá ze dvou částí. V první řadě se musí stanovit geometrické parametry tlumiče (rozměry), poté parametry, které určí dynamiku protlačení kapaliny skrze otvory v propustných podložkách tlumiče. Pro proces výpočtu je důležité znát silové veličiny, kinematické schéma podvozkové nohy, počet a typ kol, jejich elastické charakteristiky, hmotnost letounu a jeho vertikální rychlost. Tato část vychází z [9], [10], [11], [12], [13], [14] a [15].

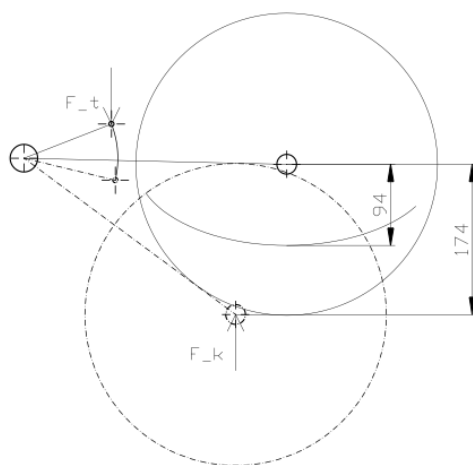
7.1 Základní geometrie tlumiče hlavního podvozku

Tabulka 13 Vstupní parametry pro návrh tlumiče hlavního podvozku

Statická síla do hlavního podvozku	F_{hz_s}	3,67	[kN]
Minimální statická síla při 15% c_{sat}	$F_{hz_{s_{min}}}$	1,82	[kN]
Maximální síla do hlavního podvozku	F_{hz_D}	9,73	[kN]
Navržená hodnota max. stlačení tlumiče	s_{max}	65	[mm]
Pneumatika	Michelin [15]	5.00-4	

U pákového mechanismu se převod mění se změnou zdvihu tlumiče dle vztahu (7.1), kde F_t je síla do tlumiče, F_k do kola, Δy je vertikální přemístění osy kola a Δs je stlačení tlumiče [9].

$$\varphi = \frac{F_t}{F_k} = \frac{\Delta y}{\Delta s} [-] \quad (7.1)$$



Obrázek 16 Geometrie pákového mechanismu

Z navrženého mechanismu je možné získat rovnici popisující kinematiku pákového převodu:

$$\varphi = 6,1167\Delta s + 2,2859 [-] \quad (7.2)$$

Dále by se každá síla v tlumiči měla přepočítat dle jeho natočení, nicméně maximální úhel mezi silou v tlumiči a svislou silou dosahuje nízkých hodnot, a proto je tento přepočet zanedbán.

Návrh tlumiče hlavního podvozku

Poloha stlačení tlumiče při působení statické síly:

$$s_{ts} = s_{max} - \frac{V_2 - V_3}{S_t} [mm] \quad (7.3)$$

Výsledná statická (7.4) a dynamická (7.5) síla v tlumiči:

$$F_{ts} = \varphi(s_{ts})Fhz_s [kN] \quad (7.4) \quad F_{td} = \varphi(s_{max})Fhz_D [kN] \quad (7.5)$$

Předpokládaný statický tlak v tlumiči byl zvolen $P_s = 870$ psi a díky tomu je možné vypočítat plochu a průměr pístu:

$$S_t = \frac{F_{ts}}{P_s} [mm^2] \quad (7.6)$$

$$d_t = \sqrt{\frac{S_t}{\pi}} [mm] \quad (7.7)$$

Tabulka 14 Základní parametry navrženého tlumiče

Zvolený statický tlak v tlumiči	$P_2 = P_s$	6	[MPa]
Rozsah statického stlačení tlumiče	s_{ts}	40-55,4	[mm]
Rozsah statické síly v tlumiči ¹	F_{ts}	4,6-9,63	[kN]
Dynamická síla v tlumiči	F_{td}	26,12	[kN]
Plocha pístu tlumiče	S_t	1600	[mm ²]
Průměr pístu tlumiče	d_t	46	[mm]

7.2 Síly v tlumiči hlavního podvozku

Celkový stlačitelný objem (7.8) je roven součinu maximálního stlačení a předpokládané plochy pístu tlumiče:

$$D_t = S_t s_{max} [cm^3] \quad (7.8)$$

Poměr mezi statickým a dynamickým tlakem by měl být 3 [12]. Poměr mezi statickým a nezatíženým tlakem by měl být 4 [12].

Dynamický tlak:

$$P_3 = \frac{F_{td}}{S_t} [MPa] \quad (7.9)$$

Dynamický objem:

$$V_3 = 0,1(S_t s) [cm^3] \quad (7.10)$$

Nezatížený objem:

$$V_1 = V_3 + D_t [cm^3] \quad (7.11)$$

¹ Pro další výpočet charakteristik tlumiče se uvažuje maximální statická síla působící v tlumiči

Návrh tlumiče hlavního podvozku

Nezatížený tlak při hodnotě polytropického exponentu $\kappa=1,1$:

$$P_1 = \frac{P_3 V_3^\kappa}{V_1^\kappa} \text{ [MPa]} \quad (7.12)$$

Nezatížený tlak (7.12) by neměl být menší než 0,51 MPa pro vyhnutí příliš měkkému tlumení a větší než 2,18 MPa pro vyhnutí skákání kola při nárazu [12].

Statický objem:

$$V_2 = \sqrt[\kappa]{\frac{P_1 V_1^\kappa}{P_2}} \text{ [cm}^3\text{]} \quad (7.13)$$

Tabulka 15 Výsledné hodnoty tlaků a objemů v průběhu stlačování tlumiče

Celkový stlačitelný objem	D_t	104	[cm ³]
Dynamický objem tlumiče	V_3	10,4	[cm ³]
Statický objem tlumiče	V_2	25,8	[cm ³]
Nezatížený objem tlumiče	V_1	114,4	[cm ³]
Dynamický tlak tlumiče	P_3	16,325	[MPa]
Nezatížený (plnicí) tlak tlumiče	P_1	1,168	[MPa]

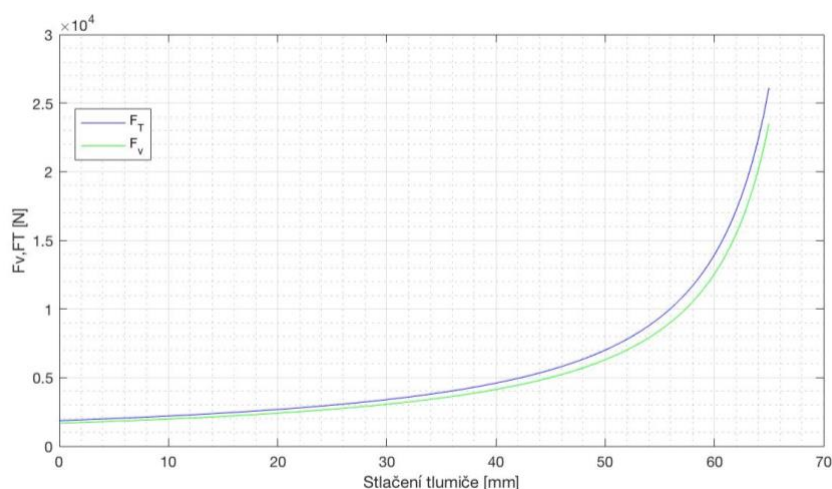
Pro vykreslení křivky závislosti zatížení tlumiče na stlačení lze použít vztahy (7.14-7.16):

$$P_x = \frac{P_1 V_1^\kappa}{(V_1 - S_t S_x)^\kappa} \text{ [MPa]} \quad (7.14)$$

$$F_V = P_x S_t \text{ [N]} \quad (7.15)$$

Síla vyvolaná třením v ucpávkách vychází ze síly vyvozené přetlakem vzduchu v tlumiči:

$$F_T = 1,1 F_V \text{ [N]} \quad (7.16)$$



Obrázek 17 Závislost stlačení tlumiče na silách vyvolaných přetlakem vzduchu v tlumiči (F_V) a třením v ucpávkách (F_T)

Návrh tlumiče hlavního podvozku

Tabulka 16 Síly v tlumiči

Maximální síla do tlumiče	$F_{t,max}$	26,12	[kN]
Pracovní síla v tlumiči	F_0	1,868	[kN]

7.3 Výpočet průtočných ploch kataraktu tlumiče hlavního podvozku

Pracovní diagram tlumiče je značně ovlivněn průběhem průtočných ploch kataraktu, a právě proto se na volbu průběhu klade značný důraz při celkovém návrhu tlumiče. V minulosti se tyto průtočné plochy navrhovali pomocí dat z funkčních tlumičů s následným značně finančně náročným zdlouhavým procesem zkoušení a hledáním optimálního průtoku pro získání požadovaného pracovního diagramu. Pro výpočet průtočných ploch je možné využít i jiného postupu. Metoda vychází z návrhu předem stanoveného pracovního diagramu, ze kterého se početně určí průběh průtočných ploch [11].

V první řadě je zapotřebí vyjádřit průběh síly F_t působící na tlumič. Pro popis pracovního diagramu je doporučeno zvolit závislost $F_t=f(s_x)$ jako kubickou parabolou (7.17).

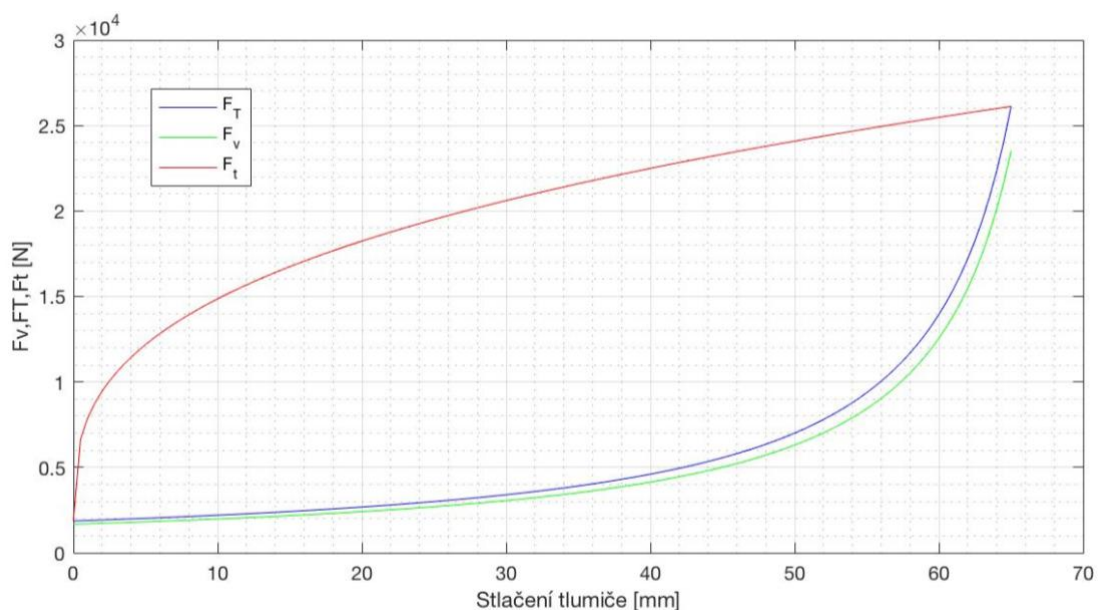
$$F_t = F_0 + ks_x^{\frac{1}{3}} \quad (7.17)$$

Kde konstanta k se určí z okrajových podmínek $s_x=s_{max}$:

$$F_t = F_{t,max} \quad (7.18)$$

$$F_{t,max} = F_0 + ks_{max}^{\frac{1}{3}} \quad (7.19)$$

$$k = \frac{F_{t,max} - F_0}{s_{max}^{\frac{1}{3}}} \quad (7.20)$$



Obrázek 18 Pracovní diagram tlumiče

Návrh tlumiče hlavního podvozku

Tlumicí energie pohlcená jedním tlumičem při dosednutí letounu:

$$E_{tl} = \int_0^{s_{max}} F_0 + ks^{\frac{1}{3}} ds [J] \quad (7.21)$$

Následná účinnost pracovního diagramu tlumiče:

$$\eta_{tl} = \frac{\int_0^{s_{max}} F_0 + ks^{\frac{1}{3}} ds}{F_{t,max}s_{max}} \quad (7.22)$$

Tabulka 17 Energetické vlastnosti tlumiče

Konstanta pracovního diagramu tlumiče	k	$6,032 \times 10^4$	[-]
Energie pohlcená jedním tlumičem	E_{tl}	$1,304 \times 10^3$	[J]
Účinnost pracovního diagramu	η_{tl}	0,77	[-]

Průběh stlačování tlumiče a pneumatiky při nárazu podvozku se zemí je možné rozdělit do dvou částí. V prvním případě probíhá pouze stlačování pneumatiky a tlumič nekoná žádný pohyb. Následně při dosažení pracovní síly tlumiče závislé na plnicím tlaku vzduchu v tlumiči a velikosti tření ucpávek dochází ke stlačování tlumiče i pneumatiky [13].

Vstupní energie letounu při doteku se zemí:

$$E_{k0} = \frac{1}{2}mv_y^2 [J] \quad (7.23)$$

Stlačení pneumatiky o dané tvrdosti v okamžiku dosažení síly F_0 v tlumiči. Vychází se opět z převodu pákového mechanismu (7.1) (nyní v obráceném případě):

$$Y_{k0} = \frac{F_k}{K} = \frac{F_0}{\varphi(s_0)K} [mm] \quad (7.24)$$

Výsledná energie převzata jednou pneumatikou při dosažení F_0 v tlumiči:

$$E_{kol0} = \eta_k F_k Y_{k0} = \eta_k \frac{F_0^2}{\varphi(s_0)^2 K} [J] \quad (7.25)$$

Rychlost těžiště letounu při dosažení F_0 v tlumiči:

$$v_{F0} = \sqrt{\frac{2(E_{k0} - 2E_{kol0})}{m}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (7.26)$$

Tabulka 18 Energetické vlastnosti pneumatiky

Účinnost pneumatiky	η_k	0,45	[-]
Tvrdost pneumatiky	K	344×10^3	[N/m ²]
Stlačení pneumatiky při dosažení F_0	Y_{k0}	1	[mm]
Energie převzata jednou pneumatikou při F_0	E_{kol0}	0,87	[J]
Rychlost těžiště při F_0	v_{F0}	2,7	[m/s]

Návrh tlumiče hlavního podvozku

Ve druhé části výpočtu dochází i k zapojení tlumiče do procesu tlumení. Pro sestavení energetické rovnice charakterizující proces tlumení je potřebné znát následující veličiny [13].

Kinetická energie letounu:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 [J] \quad (7.27)$$

Potenciální energie letounu při stlačení tlumiče a pneumatiky:

$$E_p = \frac{1}{3}mgY_{t+k} [J] \quad (7.28)$$

Energie pohlcená pneumatikou:

$$E_{kol} = \eta_k F_k Y_k [J] \quad (7.29)$$

Energie pohlcená tlumičem:

$$E_{tl} = \int_0^{s_{max}} F_t ds [J] \quad (7.30)$$

Energetická rovnice:

$$E_k = E_p - 2(E_{kol} + E_{tl}) \quad (7.31)$$

Pro výpočet rychlosti těžiště letounu z energetické rovnice je potřebné v softwaru Matlab vypočítat jednotlivé kroky přeměny energie dle komprese tlumiče.

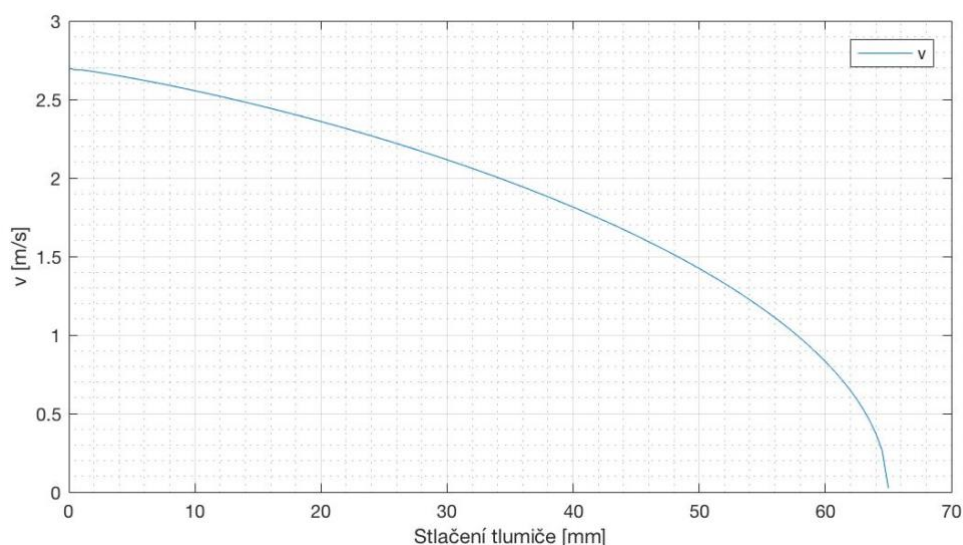
$$E_{k_{n+1}} = E_{k_n} + E_{p_n} - E_{p_{n-1}} - 2(E_{kol_{n+1}} - E_{kol_n} + E_{tl_{n+1}} - E_{tl_n}) \quad (7.32)$$

Dosazení:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_{n+1}^2 &= \frac{1}{2}mv_n^2 + \frac{1}{3}mg(Y_{k_n} - Y_{k_{n-1}} + Y_{t_n} - Y_{t_{n-1}}) \\ &\quad - 2 \left[\eta_k (F_{k_{n+1}} Y_{k_{n+1}} - F_{k_n} Y_{k_n}) + \int_{s_n}^{s_{n+1}} F_t ds \right] \end{aligned} \quad (7.33)$$

Vyjádření rychlosti těžiště pro následný krok:

$$v_{n+1} = \sqrt{v_n^2 + \frac{2}{3}g(Y_{k_n} - Y_{k_{n-1}} + Y_{t_n} - Y_{t_{n-1}}) - \frac{4}{m} \left[\eta_k (F_{k_{n+1}} Y_{k_{n+1}} - F_{k_n} Y_{k_n}) + \int_{s_n}^{s_{n+1}} F_t ds \right]} \quad (7.34)$$



Obrázek 19 Závislost stlačení tlumiče na rychlosti klesání těžiště letounu

Následně je možné vypočítat rychlost pístu (7.35) v závislosti na jeho stlačení, pomocí doby pro každý úsek zdvihu tlumiče:

$$w_{pn} = \frac{\Delta s}{t_n} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (7.35)$$

Pro průtok tlumící kapaliny otvory kataraktu platí Bernoulliho rovnice (7.36) a rovnice kontinuity (7.41):

$$\frac{1}{2} \rho w_p^2 + p_k + \rho g h_1 = \frac{1}{2} \rho w_k^2 + p_v + \rho g h_2 + \frac{\xi w_k^2 \rho}{2} \quad (7.36)$$

Ztrátová výška:

$$h_{ztr} = \frac{\xi w_k^2 \rho}{2} \quad (7.37)$$

Rozdíl polohových výšek je zanedbatelný $h_1=h_2$, rychlost v proudění v komoře se zanedbává, jelikož je značně menší než rychlost proudění kataraktem. Upravená rovnice:

$$p_k = \frac{1}{2} \rho w_k^2 + p_v + \frac{\xi w_k^2 \rho}{2} \quad (7.38)$$

Následně rovnice rychlosti proudění oleje v kataraktu:

$$w_k = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_k - p_v)} \quad (7.39)$$

Při označení $\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}}$ dostává rovnice (7.39) tvar:

$$w_k = \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_k - p_v)} \quad (7.40)$$

Návrh tlumiče hlavního podvozku

Rovnice kontinuity pro průtok nestlačitelné kapaliny:

$$A_k w_k \alpha = S_t w_p \quad (7.41)$$

$$A_k = \frac{S_t w_p}{\alpha \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_k - p_v)}} \quad (7.42)$$

Kde $\alpha \varphi = \mu$ je průtočný koeficient. Po úpravě rovnice (7.42) pro výpočet průtočné plochy kataraktu v jednotlivých krocích získáme:

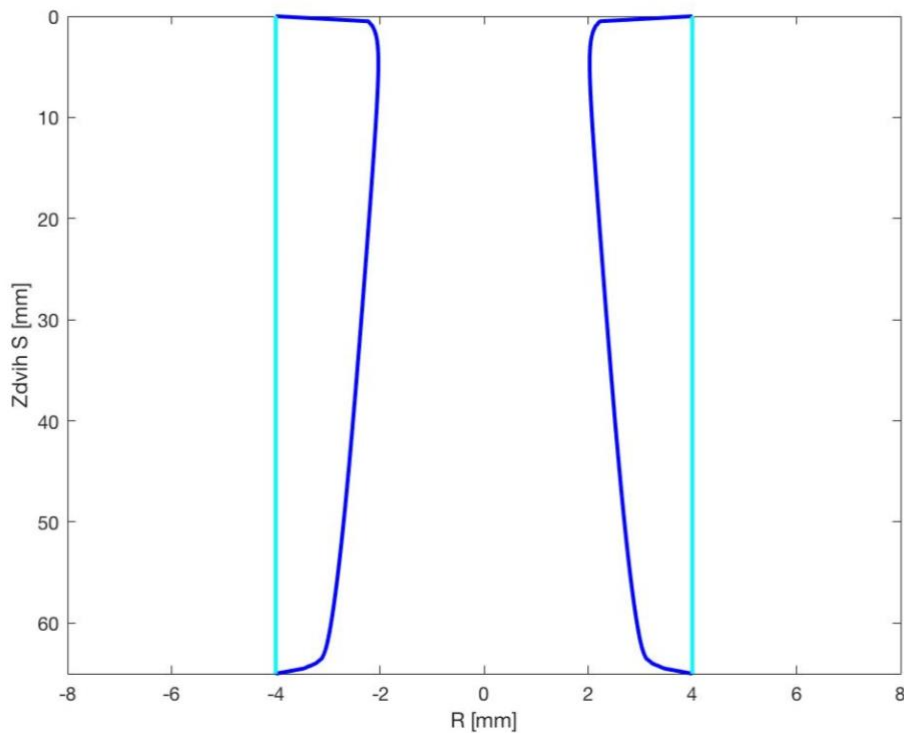
$$A_{k_n} = \frac{S_t w_{p_n}}{0,8 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{k_n} - p_{v_n})}} \quad [m^2] \quad (7.43)$$

$$p_{k_n} = \frac{F_{t_n}}{S_t} \quad [Pa] \quad (7.44)$$

$$p_{v_n} = \frac{P_1 V_1^\kappa}{(V_1 - S_t s_x)^\kappa} \quad [Pa] \quad (7.45)$$

Hydropneumatický tlumič s proměnným kataraktem je řešen tak, že otvorem mezi komorami prochází trn o proměnném poloměru:

$$R_{k_n} = \sqrt{\frac{A_{k_n}}{\pi}} \quad (7.46)$$



Obrázek 20 Geometrie jehly tlumiče (světle naznačen konstantní otvor v polopropustné podložce)²

² Souřadnice geometrie jehly je možné nalézt v příloze D

8 Návrh tlumiče příďového podvozku

Při návrhu hydropneumatického tlumiče teleskopického příďového podvozku lze vycházet ze vztahů použitých při návrhu tlumiče hlavního podvozku. Tento proces je ale ovšem ochuzen o přepočet sil vycházející z kinematiky pákového podvozku. Tato část vychází z [9], [10], [12], [13], [14], [15] a [16].

Výpočet redukované hmotnosti působící na podvozek:

$$m_{red} = \frac{m}{1 + \left(\frac{e}{l_z}\right)^2} [kg] \quad (8.1)$$

V teleskopickém uspořádání je převod (8.2) při stlačování kola a tlumiče neměnný. Úhel α určuje sklon teleskopické nohy [9].

$$\varphi = \frac{F_t \cos(\alpha)}{F_k} = konst. \quad (8.2)$$

Tabulka 19 Vstupní parametry pro návrh tlumiče příďového podvozku

Redukovaná hmotnost	m_{red}	333	[kg]
Úhel sklonu podvozku	α	15	[°]
Statická síla do příďového podvozku	F_{pz_s}	0,51	[kN]
Maximální síla do příďového podvozku	F_{pz_D}	7,03	[kN]
Navržená hodnota max. stlačení tlumiči	s_{max}	70	[mm]
Pneumatika	Michelin [15]	12.50	
Převod sil	φ	0,9655	[-]

Přepočet statické a dynamické síly působící na tlumič podvozku:

$$F_{ts} = \varphi F_{pz_s} [N] \quad (8.3)$$

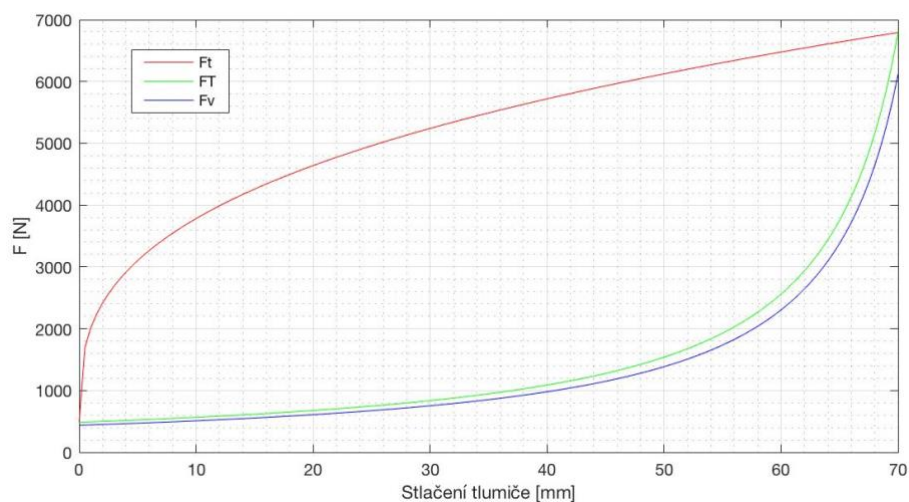
$$F_{tD} = \varphi F_{pz_D} [N] \quad (8.4)$$

Tabulka 20 Výsledné hodnoty tlaků a objemů v průběhu stlačování tlumiče

Statická síla v tlumiče	F_{ts}	0,49	[kN]
Dynamická síla v tlumiči	F_{tD}	6,79	[kN]
Plocha pístu tlumiče	S_t	800	[mm ²]
Průměr pístu tlumiče	d_t	32	[mm]
Celkový stlačitelný objem	D_t	56	[cm ³]
Dynamický objem tlumiče	V_3	5,60	[cm ³]
Statický objem tlumiče	V_2	60,8	[cm ³]
Nezatížený objem tlumiče	V_1	61,6	[cm ³]

Návrh tlumiče příd'ového podvozku

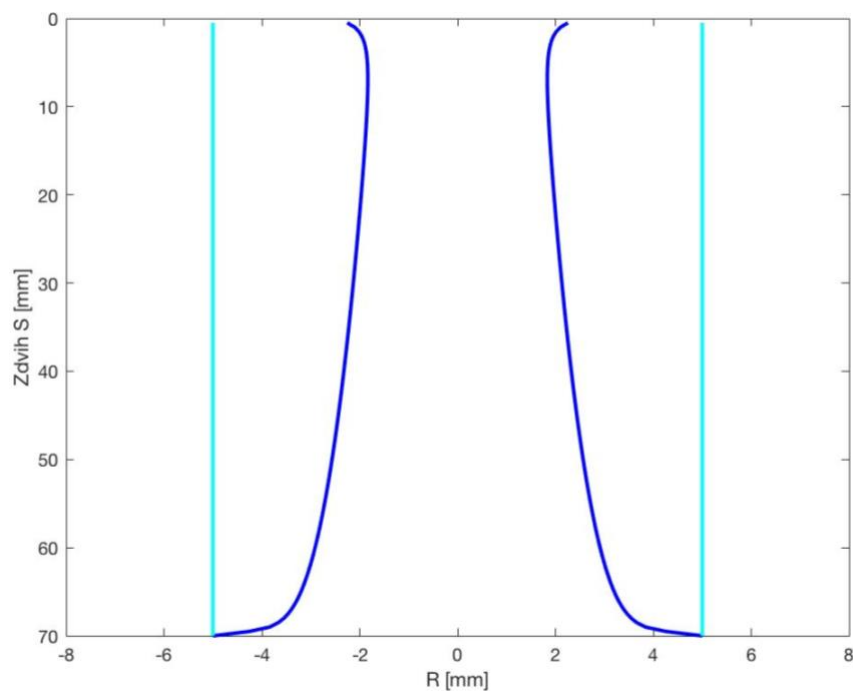
Dynamický tlak tlumiče	P_3	8,49	[MPa]
Statický tlak tlumiče	P_2	0,616	[MPa]
Nezatížený (plnicí) tlak tlumiče	P_1	0,607	[MPa]



Obrázek 21 Pracovní diagram tlumiče

Tabulka 21 Energetické vlastnosti tlumiče

Energie pohlcená tlumičem	E_{tl}	365	[J]
Účinnost pracovního diagramu	η_{tl}	0,768	[-]



Obrázek 22 Geometrie jehly tlumiče (světle naznačen konstantní otvor v polopropustné podložce)³

³ Souřadnice geometrie jehly je možné nalézt v příloze D

9 Konstrukční návrh hlavního podvozku

Hlavní podvozek letounu je složen z několika hlavních částí. Jedná se o nohu, vidlici a tlumič. Tyto jednotlivé části jsou následně propojeny pomocí šroubových spojů a čepů. Tlumič je propojen s nosníkem letounu pomocí závěsu. Tato část vychází z [17], [18] a [19].



Obrázek 23 Sestava hlavního podvozku

9.1 Podvozková noha

Jedná se o trubkovou konstrukci spojenou pomocí svarových spojů. Vodorovná část podvozkové nohy se skládá z trubek 40x1,5 a 44x2. Pod úhlem 87° je k vodorovné části přivařena trubka 50x3. Tato konstrukce je dále vyztužena pomocí trubek 18x1. Pro umožnění sklápění podvozku do šachet v trupu letounu, jsou na koncích vodorovné trubky nalisovány čepy s uložením H7/r6. Na svislé noze se nachází uložení čepu pro spojení podvozku se sklápěcím mechanismem. Pro umožnění pohybu vidlice je její spojení s nohou tvořeno pomocí dvou pouzder a čepu, který je zajištěn korunkovou maticí M10 s podložkou.



Obrázek 24 Noha hlavní podvozku

Konstrukční návrh hlavního podvozku

Tabulka 22 Použité materiály pro výrobu podvozkové nohy

Prvek konstrukce	Polotovar	Materiál	Výroba	Hmotnost [kg]
Plech	P1,5, P3	AISI 300M	Obrábění (vodní paprsek)	0,3
Trubky	Tr 18x1, Tr 29x1,5, Tr 50x3, Tr 44x2, Tr 42x1,5	AISI 300M	Řezání, broušení	1,97
Horní čepy	Tyč Ø40	6063 T3	Soustružení, vrtání	0,28
Čep vidlice	Tyč Ø26	AISI 300M	Soustružení, vrtání	0,2
Pouzdra	Tyč Ø29	BRONZ	Soustružení, vrtání	0,08

9.2 Vidlice

Jedná se o trubkovou konstrukci složenou z trubek 40x2 a 44x2 spojenou pomocí svarových spojů. Nachází se zde uložení pro osu kola podvozku. Vidlice umožňuje pákový převod od pozemního zatížení do tlumiče podvozku. Z toho důvodu vidlice disponuje oky pro uložení kloubové hlavice tlumiče. Pro spojení vidlice s hlavní nohou podvozku slouží oka umístěná na konci vidlice. Společně s plechy na horní a dolní straně tvoří uzavřenou konstrukci. Jednotlivé rovinné prvky lze obrobit frézováním nebo vodním paprskem z daného materiálu o potřebné tloušťce. Pro svaření této konstrukce je nezbytné sestavit formu, která přesně uloží polohu ok společně s dírou pro čep kola. Materiál vybraný pro tyto prvky je ocel AISI 300M.



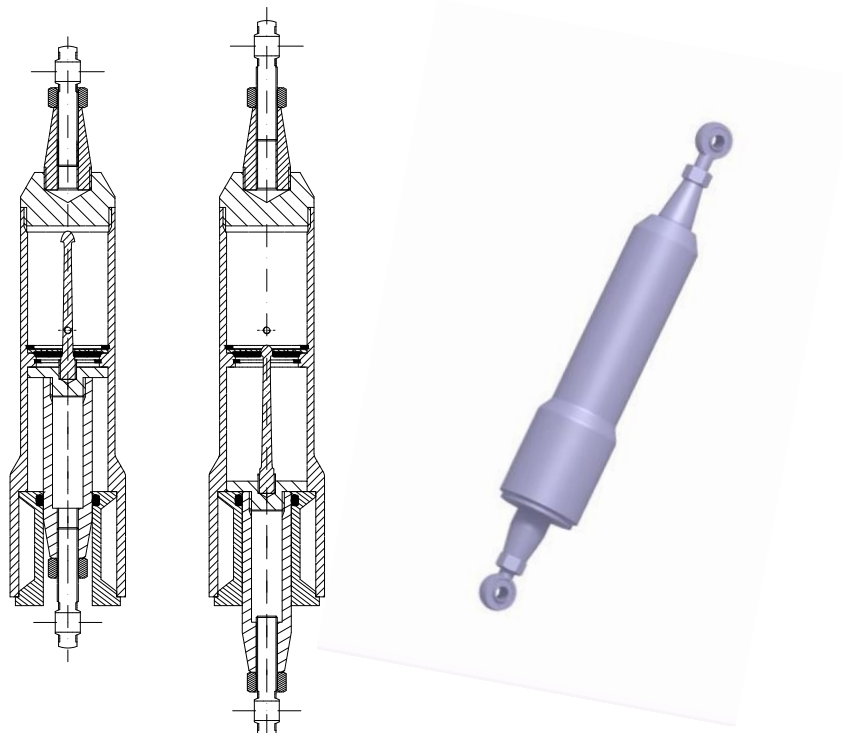
Obrázek 25 Vidlice hlavního podvozku

Tabulka 23 Použité materiály pro výrobu vidlice

Prvek konstrukce	Polotovar	Materiál	Výroba	Hmotnost [kg]
Plech	P1, P3, P4, P5, P6	AISI 300M	Obrábění (vodní paprsek)	1,22
Trubky	Tr 28x2, Tr 40x2,5, Tr 44x2,	AISI 300M	Řezání, broušení	0,72

9.3 Tlumič

Tlumič podvozku se skládá z několika hlavních částí. Výrobně nejnáročnější ovšem je tělo tlumiče, které musí mít přesné rozměry vnitřních částí pro umožnění hladkého pohybu pístu tlumiče. Při stlačení pístu dochází k přepouštění tlumícího oleje do komory s napuštěným plynem. Pro získání plynulého pohybu stlačování tlumiče je třeba zaručit povrch o nízké drsnosti na válcovitých stěnách pístní hlavy a její tyče. Pro zamezení úniku tlumící kapaliny je tlumič vybaven těsnicí maticí, která kopíruje povrch pístní tyče a obsahuje uložení pro těsnící O kroužek. Průchod tlumící kapaliny zpět do původní komory je kromě otvoru pro jehlu tlumiče zajištěn také polopropustnými podložkami, které jsou zajištěny vůči axiálnímu pohybu pojistnými kroužky. Pro spojení s vidlicí podvozku a konstrukcí letounu jsou použité kloubové hlavice RBC s vnějším závitem M12 o maximální statické síle 53 kN.



Obrázek 26 Tlumič hlavního podvozku

Tabulka 24 Použité materiály pro výrobu tlumiče hlavního podvozku

Prvek konstrukce	Polotovár	Materiál	Výroba	Hmotnost [kg]
Tělo tlumiče	Tr 70-225	6063 T6	Soustružení, vrtání	0,6
Těsnicí matice	Tr 60-65	6063 T3	Soustružení, vrtání	0,15
Spojovací matice	Tyč Ø54-31	6063 T3	Soustružení, vrtání	0,1
Hlavice	Tyč Ø45-21	6063 T3	Soustružení, vrtání	0,08
Spojka táhla (spodní)	Tyč Ø45-21	6063 T6	Soustružení, vrtání	0,1
Spojka táhla (horní)	Tyč Ø30-50	6063 T6	Soustružení, vrtání	0,05

Konstrukční návrh hlavního podvozku

Propustné podložky	P1,5	6063 T6	Obrábění (vodní paprsek), broušení	0,04
Jehlice tlumiče	Tyč Ø11-90	6063 T3	Soustružení	0,1

9.4 Závěs tlumiče

Tato sestava slouží k přenesení svislé síly od podvozku do konstrukce letounu. Hlavní část je svařena z plechů o tloušťce 3 mm. Na dosedací ploše se nachází šest otvorů pro spojení šrouby M6 k pomocnému nosníku letounu. Pro umožnění naklápění tlumiče kolem dvou os se zde nachází závěs, který je pomocí rozpěrné trubice a šroubu M6 spojen se stojinami závěsu.



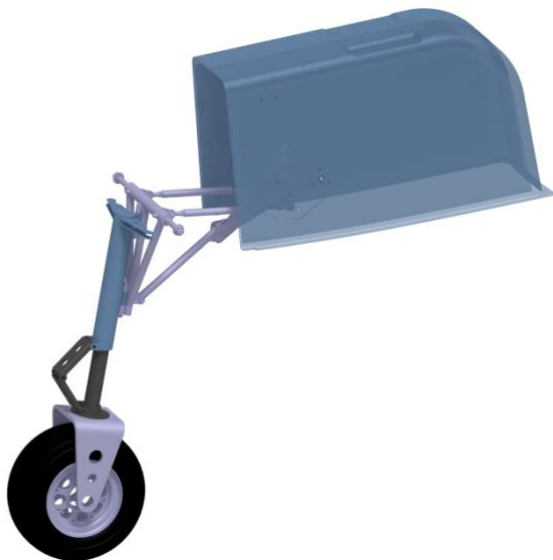
Obrázek 27 Závěs tlumiče hlavního podvozku

Tabulka 25 Použité materiály pro výrobu závěsu tlumiče hlavního podvozku

Prvek konstrukce	Polotovar	Materiál	Výroba	Hmotnost [kg]
Závěs tlumiče	P3	AISI 300M	Obrábění (vodní paprsek), vrtání, broušení	0,6
Spojka	Tyč 28x19-70	7075 T6	Frézování, vrtání	0,1
Rozpěrná trubka	Tr 10x1-36	AISI 300M	Soustružení, vrtání	0,04

10 Konstrukční návrh předového podvozku

Předový podvozek letounu je oproti hlavnímu podvozku teleskopický, a i z tohoto důvodu je složen z méně částí. V této části byl pouze řešen tlumič, jeho uložení a sklápění vychází z původního návrhu letounu. I přes prodloužení tlumiče, je stále možné sklopení podvozku do původní šachty v trupu letounu.



Obrázek 28 Sestava předového podvozku

10.1 Noha předového podvozku

Hlavní části podvozkové nohy předového podvozku jsou vidlice a pístní tyče. Tato tyč je spojena pomocí svarového spoje s ložem, které je spojeno s vidlicí čtyřmi šrouby M6. Na druhé straně tyče se nachází hlava pístu, ke které je pomocí šroubového spoje připojena proměnná jehla tlumiče. K podvozkovému loži jsou dále pomocí svaru připevněna oka pro spojení nohy s tělem tlumiče pomocí nůžek podvozku.



Obrázek 29 Noha předového podvozku

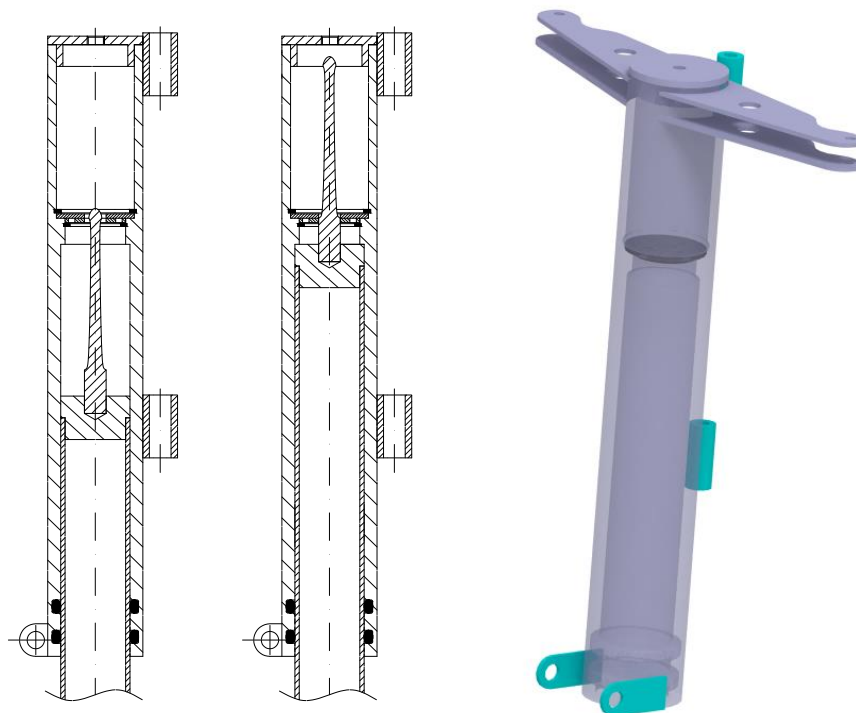
Konstrukční návrh předového podvozku

Tabulka 26 Použité materiály pro výrobu nohy předového podvozku

Prvek konstrukce	Polotovar	Materiál	Výroba	Hmotnost [kg]
Vidlice	P6	6063 T6	Obrábění (vodní paprsek), vrtání, broušení, ohýbání	2,15
Pístní trubice	Tr 32x3-250	AISI 300M	Soustružení, vrtání	0,5
Hlavice	Tyč Ø35-20	6063 T3	Soustružení, vrtání	0,2
Lože pístní trubice	Tr 80x25-18	AISI 300M	Soustružení, vrtání	0,2
Jehlice tlumiče	Tyč Ø10-84	6063 T3	Soustružení	0,08

10.2 Tlumič předového podvozku

Hlavní částí tlumiče je jeho tělo. Ve spodní části těla tlumiče se nachází dvě uložení pro těsnící O kroužky a v horní pro pojistné kroužky. Opět zde musí být dosažena nízká drsnost vnitřního povrchu z důvodu eliminace tření. K zadní straně těla tlumiče jsou přivařeny spojovací trubice, které slouží k přenesení silového působení do konstrukce motorového lože. Díky tomu, že se jedná o čepové uložení, je možné kolem této osy trubice natáčet předový podvozek. Horní část tlumiče je uzavřena pomocí šroubového spoje hlavicí, ve které se nachází i plnicí ventil. Průchod tlumičí kapaliny zpět do původní komory je stejně jako u tlumiče hlavního podvozku vyřešen pomocí polopropustných podložek. Tyto podložky jsou zajištěny vůči axiálnímu pohybu pojistnými kroužky, nicméně, nachází se zde vůle pro možný posun spodní podložky a tím umožnění průchodu kapaliny otvory.



Obrázek 30 Tlumič předového podvozku

Konstrukční návrh příďového podvozku

Tabulka 27 Použité materiály pro výrobu tlumiče příďového podvozku

Prvek konstrukce	Polotovár	Materiál	Výroba	Hmotnost [kg]
Tělo tlumiče	Tr 44x10-282	6063 T6	Soustružení, vrtání	0,5
Spojovací trubice	2xTr 14x2-29	7075 T6	Soustružení, vrtání	0,04
Hlavice	Tyč Ø35-20	6063 T3	Soustružení, vrtání	0,2
Páky řízení	P2	6063 T3	Obrábění (vodní paprsek), vrtání, broušení	0,08
Držáky nůžek	P2	6063 T6	Obrábění (vodní paprsek), vrtání, broušení	0,02

10.3 Nůžky podvozku

Nůžky jsou jediným mechanismem určeným v tomto návrhu pro zabránění nechtěného vysunutí příďové podvozkové nohy z těla tlumiče. Dále umožňují přenos otáčivého momentu z těla tlumiče na podvozkovou nohu a umožní tak zatočení letounu při pojíždění. Tato konstrukce musí být schopná se stlačovat stejně jako tlumič podvozku, z tohoto důvodu jsou všechna tři uložení pohyblivá.



Obrázek 31 Nůžky podvozku

Tabulka 28 Použité materiály pro výrobu nůžek podvozku

Prvek konstrukce	Polotovár	Materiál	Výroba	Hmotnost [kg]
Plechy	P2	AISI 300M	Obrábění (vodní paprsek), vrtání, broušení	0,26
Rozpěrné trubice	2xTr 10x1	AISI 300M	Soustružení, vrtání	0,008
Držáky nůžek	P2	AISI 300M	Soustružení, vrtání	0,2

11 Pevnostní kontrola hlavního podvozku

Z výsledků získaných v předchozích kapitolách je patrné, že největší zatížení vzniká při přistání s příďovým podvozkem těsně nad zemí. Pro vyšetření pevnostní analýzy byla zvolena MKP analýza v programu MSC Patran-Nastran. Po vytvoření modelu v programu Catia V5R21, lze tyto modely převést pomocí formátu STEP do výpočetního softwaru.

Tabulka 29 Provozní síly v místě působení na ose kola

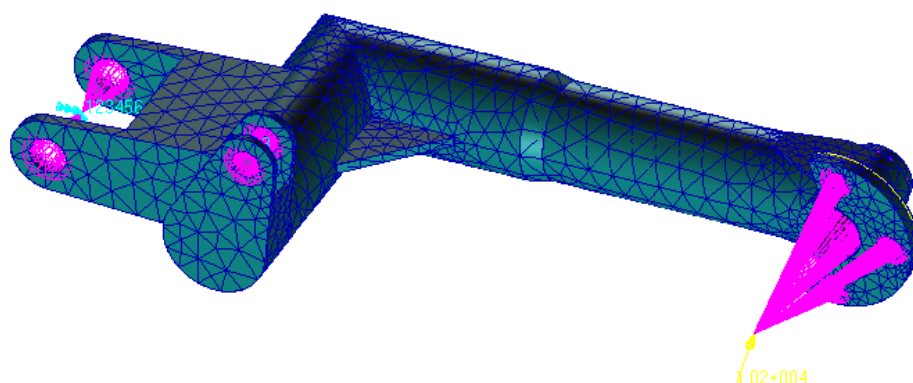
Provozní síla v ose z	F_z	9733,5	[N]
Provozní síla v ose x	F_x	3087,4	[N]

11.1 Vidlice

Síť vidlice v programu Patran je tvořena 3D prvky Tet 10 o rozměru 10 mm. Toto nastavení má za následek vytvoření sítě o 18144 nodech a 9132 elementech. Pomocí MPC prvků RBE2 jsou zavedeny okrajové podmínky a síla na patřičném rameni reprezentující působení sil na ose kola. Tyto MPC prvky jsou nastaveny pro přenos všech složek zatížení. Okrajové podmínky jsou zavedeny do koncových a středových ploch vidlice, přičemž okrajové podmínky ve středovém oku slouží pouze k zamezení pohybu v ose z. Jedná se o simulaci tlumiče v maximálně stlačené poloze. Silové působení je zavedeno do osy kola. Materiál této vidlice je ocel AISI 300M s materiálovými charakteristikami $E=205$ GPa a $\mu=0,28$ [20].

Tabulka 30 Materiálové charakteristiky oceli AISI 300M

Mez pevnosti	R_m	1970	[MPa]
Mez kluzu	$R_{p0,2}$	1655	[MPa]
Hustota	ρ	7870	[kg/m ³]

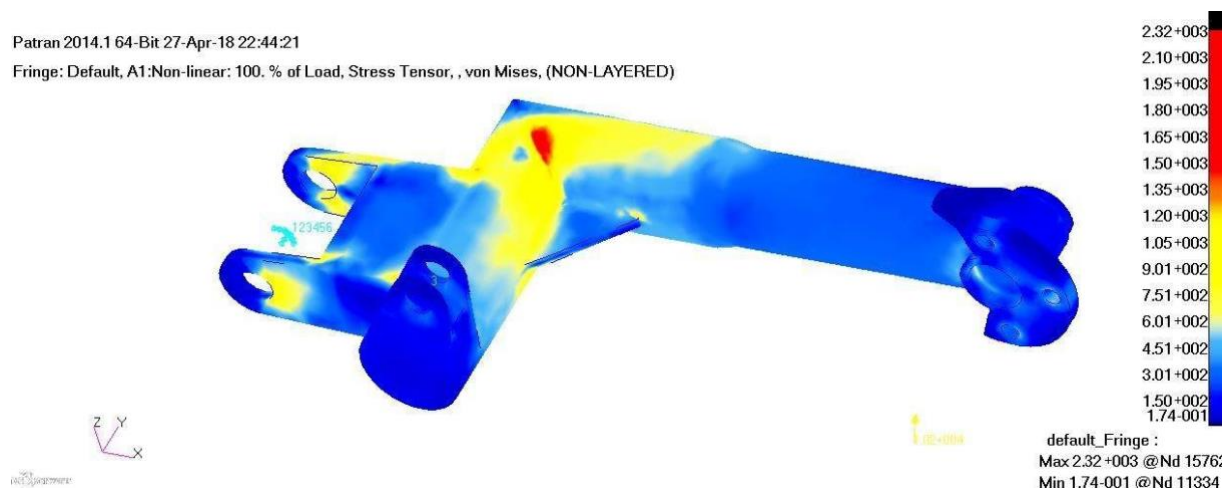


Obrázek 32 Síť vidlice v programu MSC Patran

Pevnostní kontrola hlavního podvozku

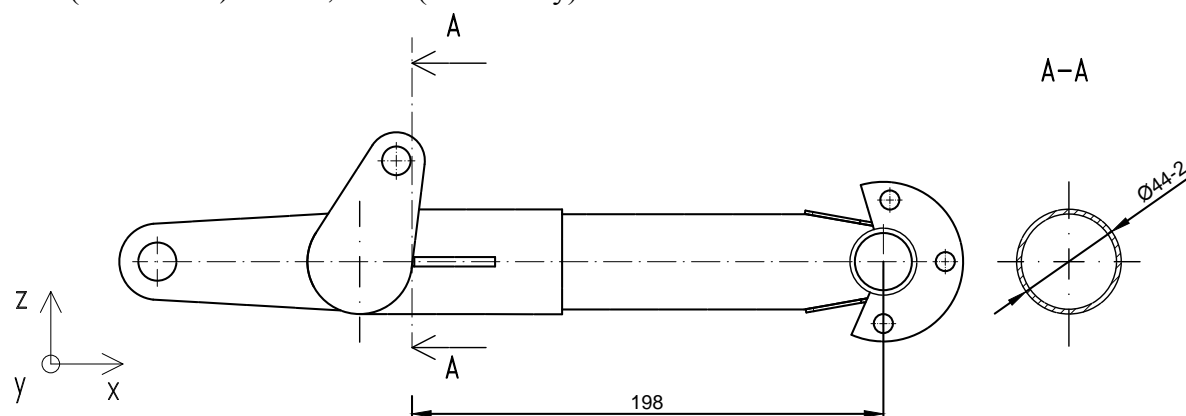
Patran 2014.1 64-Bit 27-Apr-18 22:44:21

Fringe: Default, A1:Non-linear: 100. % of Load, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



Obrázek 33 Výsledek nelineární analýzy vidlice

Z výsledku analýzy je patrná značná koncentrace napětí v místě svaru trubek pod úhlem 45°. Tento výsledek je způsoben převážně ostrou hranou styku. Taktéž zde není uvažován přídavek materiálu vzniklý při svařování této konstrukce dle dodané výkresové dokumentace. Pro přehlednější vyšetření analýzy došlo k úpravě spektra zatížení, díky tomu lze říci, že napětí v jednotlivých částech (kromě místa svaru) je pod mezí kluzu. Ostatní případy zatížení je možné nalézt v příloze C. Při reálném zatížení tedy nedojde ke vzniku plastických deformací. Pro posouzení správnosti výsledků z MKP analýzy je vhodné, provést numerickou kontrolu ve vybraném řezu. Pro daný řez platí vzdálenost od působíště síly $l=198$ mm (ve směru x) a $d=95,7$ mm (ve směru y) viz obrázek 34.



Obrázek 34 Zobrazení místa kontrolovaného řezu

Tabulka 31 Vstupní parametry pro numerickou kontrolu

Vzdálenost řezu od místa působení v ose x	l	198	[mm]
Vzdálenost řezu od místa působení v ose y	d	95,56	[mm]
Ohybový moment kolem osy y	$M_{oy} = F_z * l$	1927	[Nm]
Ohybový moment kolem osy z	$M_{oz} = F_x * d$	295	[Nm]
Kroutící moment	$M_k = F_z * d$	931	[Nm]
Modul průřezu v ohybu	W_o	2650	[mm ³]
Plocha průřezu	S	263,9	[mm ²]

Pevnostní kontrola hlavního podvozku

Napětí v tlaku a ohybu:

$$\sigma_t = \frac{F_{x0}}{S} \text{ [MPa]} \quad (11.1) \quad \sigma_{oy} = \frac{M_{0y}}{W_o} \text{ [MPa]} \quad (11.2) \quad \sigma_{oz} = \frac{M_{0z}}{W_o} \text{ [MPa]} \quad (11.3)$$

Napětí v krutu:

$$\tau_k = \frac{M_k}{2U_t} \text{ [MPa]} \quad (11.4)$$

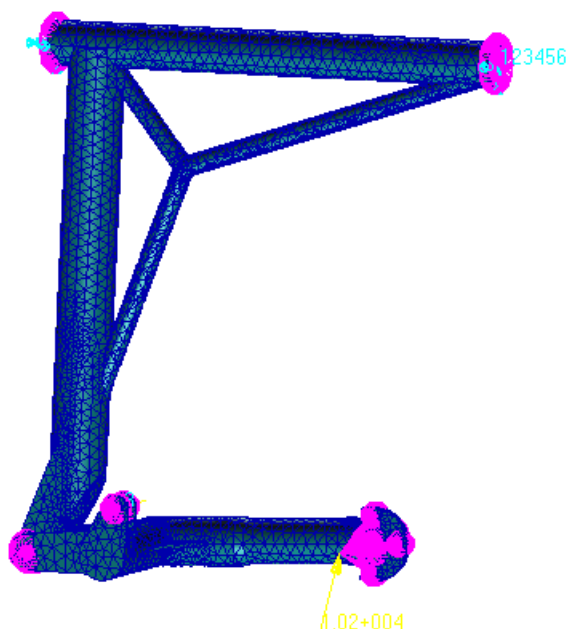
Redukované napětí:

$$\sigma_{red} = \sqrt{(\sigma_t + \sigma_{oy} + \sigma_{oz})^2 + 4\tau_k^2} = 926,7 \text{ [MPa]} \quad (11.5)$$

Z výsledku redukovaného napětí (11.5) lze usuzovat, že provedená MKP analýza udává správné výsledky.

11.2 Sestava

Síť sestavy v programu Patran je opět tvořena 3D prvky Tet 10 o rozměru 10 mm. Toto nastavení má za následek vytvoření sítě o 68123 nodech a 34464 elementech. Pomocí MPC prvků RBE2 jsou zavedeny okrajové podmínky do konců vodorovné trubky, pro uchycení celého podvozku do konstrukce centroplánu. Dále je tímto způsobem také zavedena síla do ok závěsu. Materiál nohy je ocel AISI 300M [20].



Obrázek 35 Síť sestavy v programu MSC Patran

Patran 2014.1 64-Bit 27-Apr-18 13:39:13

Fringe: Default, A1:Non-linear: 100, % of Load, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)

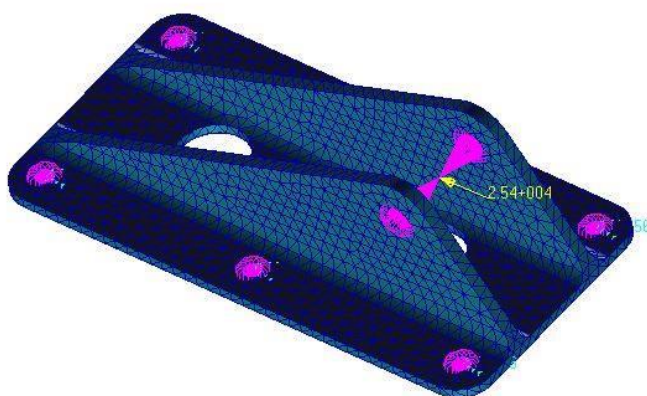


Obrázek 36 Výsledek nelineární analýzy sestavy

Z obrázku 36 lze říci, že při provozním zatížení napětí nepřekročí mez kluzu, nicméně opět se zde nachází značná koncentrace napětí v místě svaru, jak už bylo řečeno v předchozí analýze. Je vhodné považovat tento spoj za kritický a dbát zvýšené pozornosti při jeho konstrukci a následné pádové zkoušce. Ostatní případy zatížení je možné nalézt v příloze A.

11.3 Závěs

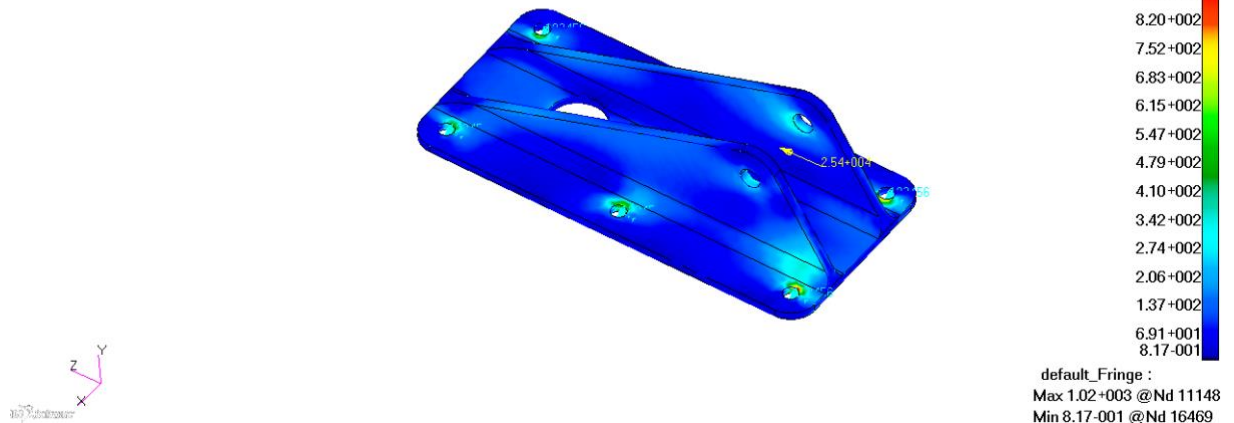
Síť závěsu v programu Patran je opět tvořena 3D prvky Tet 10 o rozměru 10 mm. Toto nastavení má za následek vytvoření sítě o 18031 nodech a 9181 elementech. Pomocí MPC prvků RBE2 jsou zavedeny okrajové podmínky do děr, pro uchycení závěsu k pomocnému nosníku. Pomocí RBE2 prvků je také zavedena síla do ok závěsu. Materiál závěsu je ocel AISI 300M. Závěs slouží v tomto případě pouze k přenesení síly ve směru z, a proto je kontrolován pouze v případě největšího zatížení.



Obrázek 37 Síť závěsu v programu MSC Patran

Patran 2014.1 64-Bit 11-Apr-18 20:52:58

Fringe: Default, A4:Non-linear: 100. % of Load, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



Obrázek 38 Výsledek nelineární analýzy závěsu

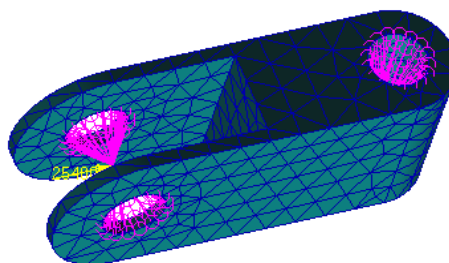
Z analýzy je patrné, že při provozním zatížení napětí nepřekročí mez kluzu a tudíž nenastane plastická deformace.

11.4 Unašeč

Síť unašeče v programu Patran je opět tvořena 3D prvky Tet 10 o rozměru 10 mm. Toto nastavení má za následek vytvoření sítě o 3358 nodech a 1772 elementech. Pomocí MPC prvků RBE2 je zavedena okrajová podmínka do díry pro čep. Také pomocí RBE2 prvku je zavedena síla do ok, simulující spojení s tlumičem. Unašeč stejně jako závěs slouží v tomto případě pouze k přenesení síly ve směru z, a proto je kontrolován pouze na největší zatížení. Materiál unašeče je slitina hliníku 7075 T6 [21].

Tabulka 32 Materiálové charakteristiky slitiny hliníku 7075 T6

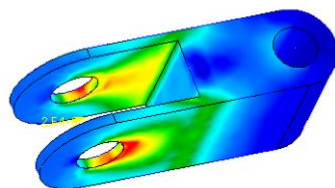
Mez pevnosti	R_m	576	[MPa]
Mez kluzu	$R_{p0,2}$	503	[MPa]
Hustota	ρ	2820	[kg/m ³]



Obrázek 39 Síť unašeče v programu MSC Patran

Patran 2014.1 64-Bit 11-Apr-18 21:37:33

Fringe: SC1:DEFAULT, A3:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



default_Fringe :
Max 3.56+002 @Nd 1496
Min 2.75+000 @Nd 1647

Obrázek 40 Výsledek lineární analýzy unašeče

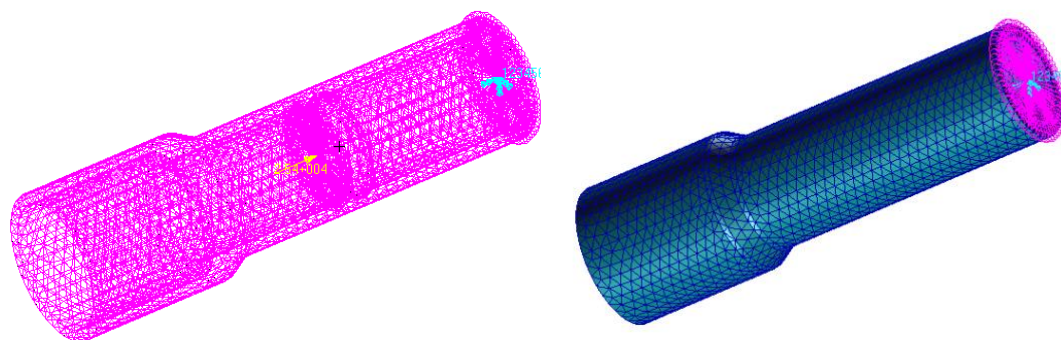
Z analýzy je patrné, že při provozním zatížení napětí nepřekročí mez kluzu a tudíž nenastane plastická deformace.

11.5 Tělo tlumiče

Sít' těla je tvořena 3D prvky Tet 10 o rozměru 10 mm o 23980 nodech a 12892 elementech. Pomocí MPC prvků je zde nastavena okrajová podmínka na konci tlumiče a síla, která působí na jeho vnitřní hranu, simulující dosednutí hlavy pístu. Tento případ by nastal pouze v případě úniku tlumícího plynu nebo oleje. Materiál těla je slitina hliníku 6063 T6 [21].

Tabulka 33 Materiálové charakteristiky slitiny hliníku 6063 T6

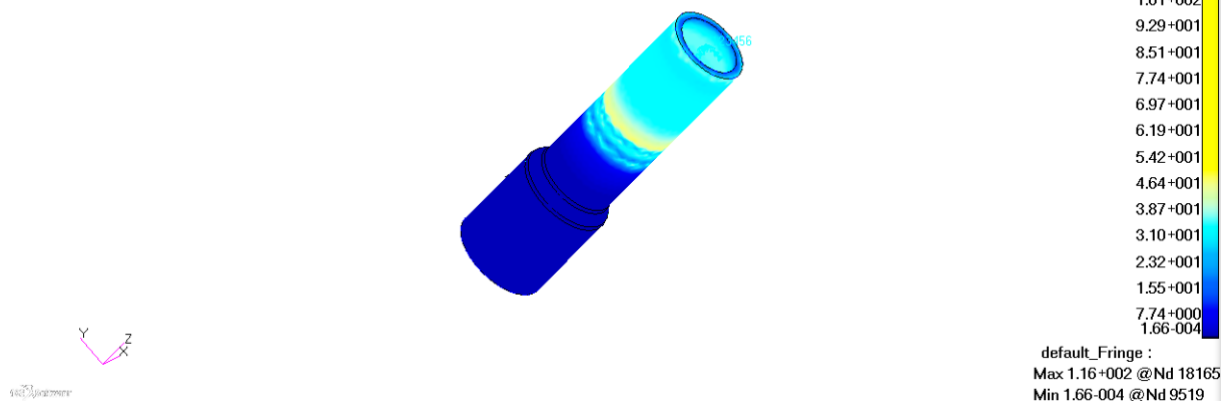
Mez pevnosti	R_m	200	[MPa]
Mez kluzu	$R_{p0,2}$	170	[MPa]



Obrázek 41 Sít' těla tlumiče v programu MSC Patran

Patran 2014.1 64-Bit 12-Apr-18 16:14:54

Fringe: Default, A2:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)

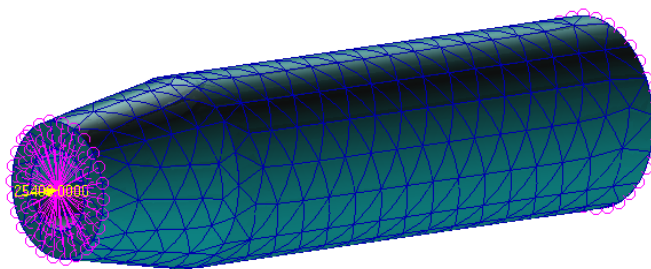


Obrázek 42 Výsledek lineární analýzy těla tlumiče

Pomocí výsledku zobrazených na obrázku 42 lze říci, že tělo tlumiče je vhodně navrženo i pro extrémní možný případ s vypuštěným tlumičem. Také byla provedena Buckling analýza na vzpěrnou stabilitu s výsledným faktorem 130. Tento výsledek značí to, že nedojde ke ztrátě vzpěrné stability.

11.6 Pístní tyč

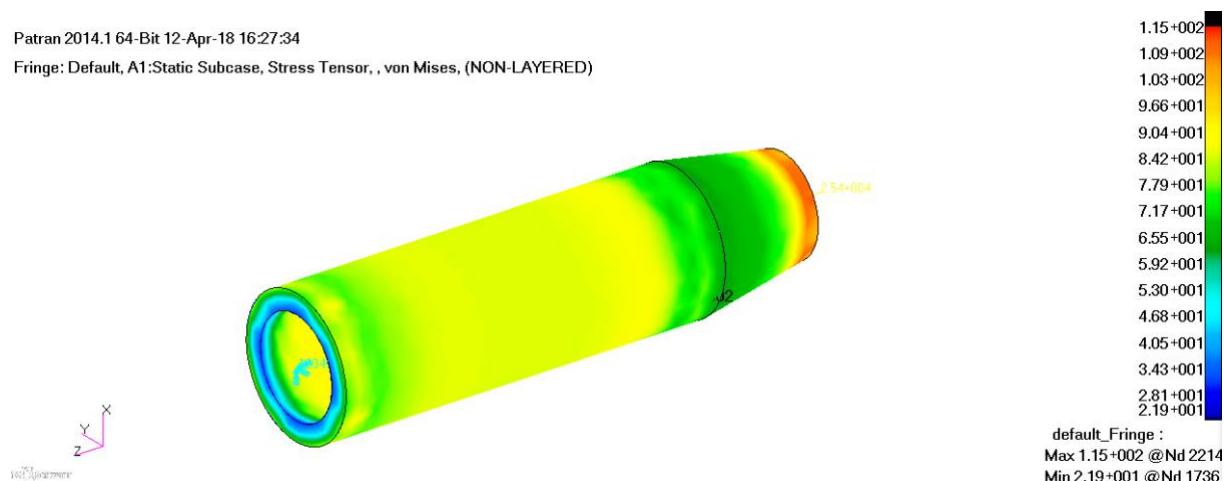
Síť Pístní tyče je tvořena 3D prvky Tet 10 o rozměru 5 mm o 4017 nodech a 2093 elementech. Pomocí MPC prvků je zde nastavena okrajová podmínka v místě spojení s hlavou pístu a síla, která působí v místě uložení kloubové hlavice. Materiál pístní tyče je slitina hliníku 6063 T6 [20].



Obrázek 43 Síť pístní tyče tlumiče v programu MSC Patran

Patran 2014.1 64-Bit 12-Apr-18 16:27:34

Fringe: Default, A1:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)

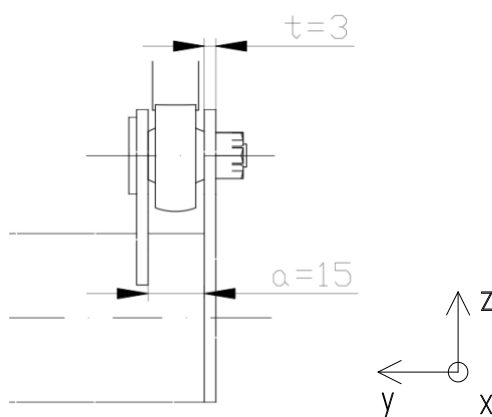


Obrázek 44 Výsledek lineární analýzy pístní tyče tlumiče

Z výsledku na obrázku 44 je patrné, že tato část tlumiče vyhovuje maximálnímu zatížení. Napětí v součásti nepřekóná mez kluzu, a proto nenastane deformace. Při analýze vzpěrné stability byl určen výsledný faktor 8.

11.7 Čep kloubové hlavice

Při kontrole čepu je uvažováno spojitě zatížení od ok vidlice a kloubové hlavice. Materiál čepu je ocel AISI 300M. Tato kontrola vychází z početního zatížení s bezpečností 1,5.



Obrázek 45 Oka vidlice pro spojení s kloubovou hlavicí tlumiče

Tabulka 34 Vstupní hodnoty pro výpočet pevnostní kontroly čepu tlumiče

Provozní síla v ose z v místě působení tlumiče	F_{t0}	25400	[N]
Početní síla v ose z v místě působení tlumiče	F_t	38100	[N]
Modul průřezu v ohybu	W_O	130,7	[mm ³]
Průměr čepu	-	11	[mm]

Pevnostní kontrola hlavního podvozku

Výpočet spojitěho zatížení:

$$q_1 = \frac{F_t}{2t} = 6350 \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (11.6)$$

$$q_2 = \frac{F_t}{a} = 2540 \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (11.7)$$

Výsledný ohybový moment zatížení:

$$M_{ot} = q_1 t \left(\frac{t}{2} + \frac{a}{2} \right) - \frac{q_2 \left(\frac{a}{2} \right)^2}{2} = 100 [Nm] \quad (11.8)$$

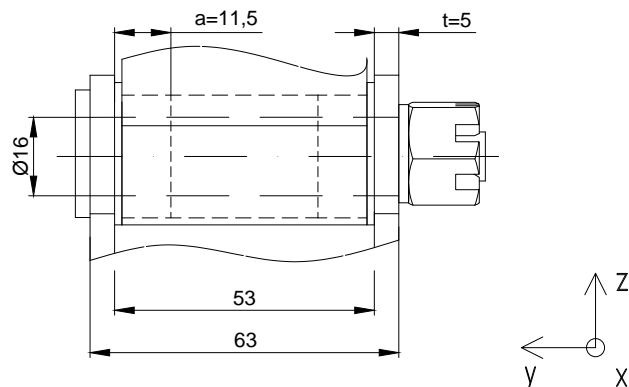
Výsledné napětí v ohybu:

$$\sigma_{ot} = \frac{M_{ot}}{W_o} = 765 < 1970 [MPa] \quad (11.9)$$

Dle výpočtu ohybového napětí (11.9) je zřejmé, že čep je předimenzovaný. V tomto případě je možné pouze použít jiný materiál, jelikož průměr čepu je dán otvorem v kloubové hlavici.

11.8 Čep spoje nohy a vidlice

Při kontrole čepu je uvažováno spojitě zatížení od ok vidlice a pouzder. Materiál čepu je slitina hliníku 7075 T6. Tato kontrola vychází z početního zatížení s bezpečností 1,5.



Obrázek 46 Spoj vidlice s nohou hlavního podvozku

Tabulka 35 Vstupní hodnoty pro výpočet pevnostní kontroly čepu spoje nohy a vidlice

Vzdálenost mezi působišťem síly na ose kola a středu vidlice	c	28,9	[mm]
Ohybový moment od síly F_x	M_{0z}	165	[Nm]
Početní síla od ohybového momentu	$F_{0z} = \frac{M_{0z}}{c}$	5701	[N]
Kroutící moment od síly F_z	M_k	521	[Nm]
Početní síla od kroutícího momentu	$F_k = \frac{M_k}{c}$	17973	[N]
Početní síla v ose x	$F_{xp} = F_x * 1.5$	4631	[N]
Modul průřezu v ohybu	W_o	402,2	[mm ³]
Průměr čepu	-	16	[mm]

Pevnostní kontrola hlavního podvozku

Výpočet celkové působící síly:

$$F_t = \sqrt{F_k^2 + (F_{0z} + F_{xp})^2} = 20731 \text{ [N]} \quad (11.10)$$

Výpočet spojitého zatížení:

$$q_1 = \frac{F_t}{2t} = 2073 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right] \quad (11.11) \quad q_2 = \frac{F_t}{2a} = 901 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right] \quad (11.12)$$

Výsledný ohybový moment zatížení:

$$M_{ot} = q_1 t \left(\frac{53}{2} + \frac{t}{2} \right) - q_2 a \left(\frac{53}{2} - \frac{a}{2} \right) = 86 \text{ [Nm]} \quad (11.13)$$

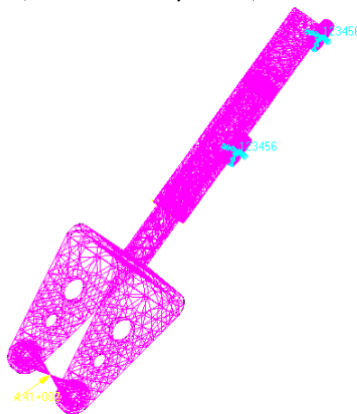
Výsledné napětí v ohybu:

$$\sigma_{ot} = \frac{M_{ot}}{W_o} = 212 < 576 \text{ [MPa]} \quad (11.14)$$

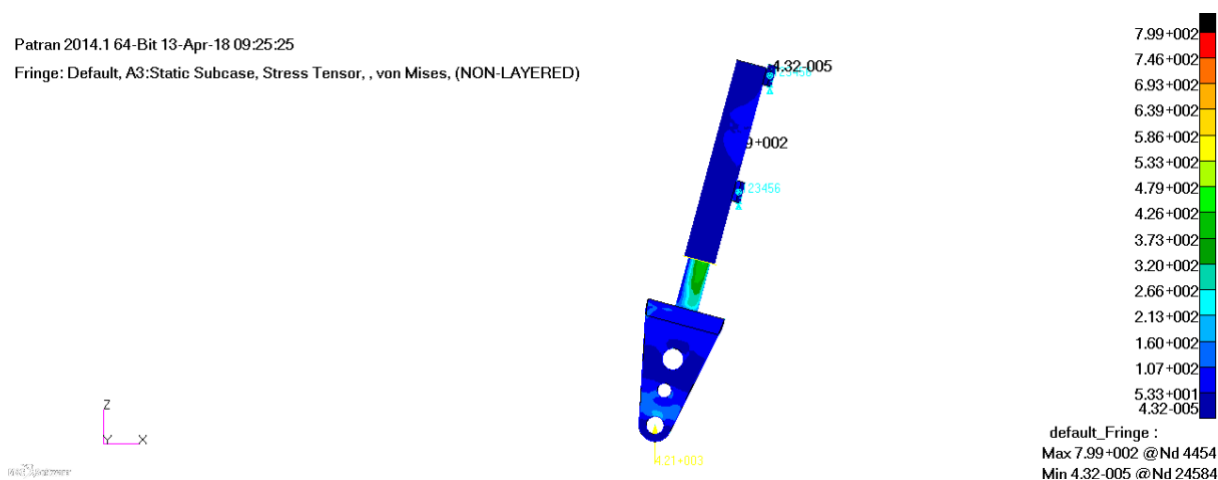
Dle výpočtu ohybového napětí (11.14) je zřejmé, že čep je předimenzovaný. V tomto případě je možné použít jiný materiál nebo zmenšit rozměry tohoto spoje.

12 Pevnostní kontrola příďového podvozku

Při pevnostní analýze příďového podvozku v programu Patran byla kontrolována sestava ve složení vidlice, pístní tyče a těla tlumiče. Simulovaná propojení mezi jednotlivými tělesy byla provedena pomocí MPC prvků RBE2 stejně jako zavedené okrajové podmínky do spojovacích trubic. Síť této sestavy je tvořena 3D prvky Tet 10 o rozměru 10 mm o 25294 nodech a 13778 elementech. Použité materiály jsou ocel AISI 300M ($E=205$ GPa, $\mu=0,28$) u pístní tyče a slitina hliníku 6064 T6 ($E=71$ GPa, $\mu=0,3$) u vidlice a těla tlumiče [20], [21].



Obrázek 47 Síť sestavy příďového podvozku programu MSC Patran



Obrázek 48 Výsledek lineární analýzy sestavy příďového podvozku

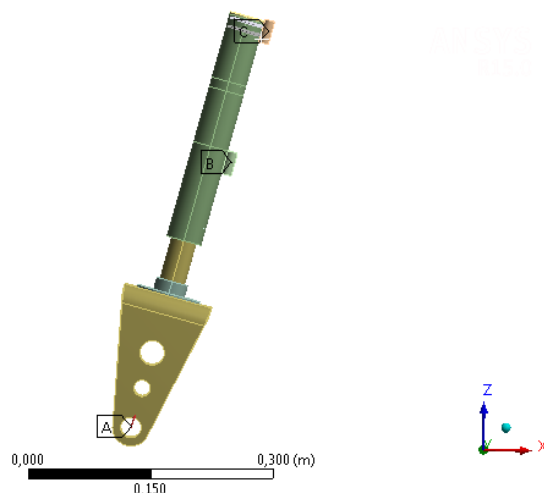
Při kontrole všech případů pozemního zatížení je stěžejní případ dodatečné zatížení-a. Nejvyšší napětí je možné pozorovat na konci pístní tyče při kontaktu stlačené tyče s tělem tlumiče. Tento výsledek lze brát pouze jako orientační, jelikož při deformaci tlumiče nastane kontakt i mezi zbylou částí tyče a těla tlumiče. I přes tento předpoklad je výsledné napětí značně pod mezí kluzu oceli, což znamená, že tento návrh je předimenzovaný. Je tomu také proto, že z výpočtu tlumiče vychází průměr průřezu komory s olejem 32 mm. Pro zabezpečení funkčnosti těsnění a snížení výrobní náročnosti těla tlumiče je vhodné, aby tímto průměrem disponovala i pístní tyč. Ostatní případy zatížení je možné nalézt v příloze B.

12.1 Čep spoje nohy a držáku

Pomocí statické analýzy provedené v programu Ansys je možné provést pevnostní kontrolu čepu spoje nohy a jeho uložení.

A: Static Structural
Static Structural
Time: 1, s
12.4.2018 20:44

A Bearing Load: 7363,8 N
B Cylindrical Support: 0, m
C Cylindrical Support 2: 0, m

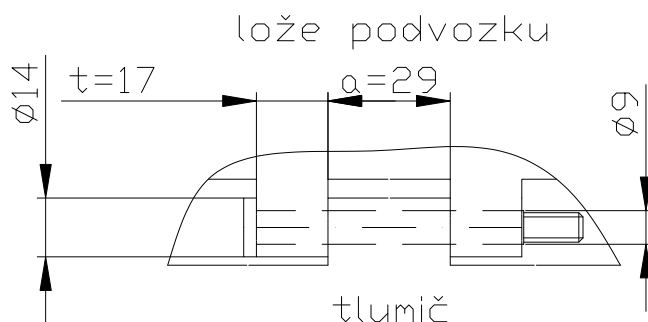


Obrázek 49 Statická analýza příďového podvozku

Z výsledků je patrné, že největší zatížení je přenášeno spodním uložením, a proto byla provedena kontrola pouze spodního čepu. Pro kontrolu byl vybrán dodatečný případ-a s maximální celkovou silou 9369,8 N. Materiál navrhovaného čepu je ocel AISI 300M [19] a polotovary tyč Ø14-80. Výkresová dokumentace čepu a uložení příďového podvozku nejsou součástí této diplomové práce, nicméně pro zajištění axiálního posuvu je vhodné použít pojistný kroužek.

Tabulka 36 Výsledné reakce ve spodním uložení

	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
Vodorovné přistání se skloněnými reakcemi	-1411	0	-5587
Zatížení podvozku při brždění	3857	0	-119
Dodatečné podmínky - a	-6276	0	-6958
Dodatečné podmínky - b	7344	0	3338
Dodatečné podmínky - c	2810	-6722	0



Obrázek 50 Spoj příďového podvozku s konstrukcí letounu

Pevnostní kontrola příďového podvozku

Tabulka 37 Vstupní hodnoty pro výpočet pevnostní kontroly čepu spoje podvozku a konstrukce letounu

Provozní síla v polovině podpory B v ose x soustavy	F_x	6276	[N]
Provozní síla v polovině podpory B v ose z soustavy	F_z	6968	[N]
Modul průřezu v ohybu	W_o	71,6	[mm ³]
Úhel mezi souřadnou soustavou sestavy a čepu	α	15	[°]

Výpočet početní síly působící v polovině čepu:

$$F_t = (F_z \cos \alpha + F_x \sin \alpha) 1,5 = 12517 \text{ [N]} \quad (12.1)$$

Výpočet spojitého zatížení:

$$q_1 = \frac{F_t}{2t} = 224,8 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right] \quad (12.2) \quad q_2 = \frac{F_t}{a} = 263 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right] \quad (12.3)$$

Výsledný ohybový moment zatížení:

$$M_{ot} = q_1 t \left(\frac{t}{2} + \frac{a}{2} \right) - \frac{q_2 \left(\frac{a}{2} \right)^2}{2} = 99 \text{ [Nm]} \quad (12.4)$$

Výsledné napětí v ohybu:

$$\sigma_{ot} = \frac{M_{ot}}{W_o} = 1377 < 1970 \text{ [MPa]} \quad (12.5)$$

Dle výpočtu ohybového napětí (12.5) je zřejmé, že navrhovaný čep přenesení požadované zatížení.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo najít vhodnou úpravu stávajícího podvozku letounu TL-Stream pro splnění podmínek certifikace dle předpisu CS-23. Splnění tohoto zadání bylo možno docílit hned několika způsoby. V první řadě vedla práce k úpravě kinematiky pákového podvozku, nicméně pro zachování schopnosti zasunutí kol do šachet centroplánu letadla pomocí tlumiče uloženého v bočním nosníku, bylo od změny pákového mechanismu upuštěno. Díky tomuto faktu vedla práce k návrhu tlumiče hlavního a příďového podvozku.

První část práce se zabývá přehledem typů přistávacích zařízení a jejich tlumících elementů. Tato část vedla k výběru typu tlumiče hlavního podvozku. Výsledkem se stal díky vysoké tlumící účinnosti hydropneumatický tlumič. Prvotním krokem pro návrh tlumiče bylo získání potřebného zatížení dle předpisu CS-23. U návrhu hlavního podvozku je rozhodující zatížení při vodorovném přistání s příďovým kolem těsně nad zemí. U příďového podvozku je rozhodující zatížení při vodorovném přistání se skloněnými reakcemi s přední centráží.

Konstrukční návrh tohoto typu tlumiče je možné řešit několika způsoby. Pro nižší konstrukční náročnost byl zvolen jednodurkový tlumič s jehlou o proměnném průřezu, díky kterému dochází k proměnlivému průtoku kapaliny do komory se stlačeným plynem v závislosti na stlačení tlumiče. Výpočet tlumiče byl proveden na základě podkladů pro návrh hydropneumatického tlumiče. Jelikož v tomto výpočtu vystupuje několik veličin, které je možno zvolit na základě doporučení v příslušných oporách, je třeba takto k tomuto výpočtu i přistupovat. Po zhotovení tlumiče je nezbytné jeho odzkoušení na padostroji a získání přesných vstupních hodnot. Pokud nastane značné odchýlení od použitých hodnot, je nezbytné provést úpravu tlumiče dle nových výpočtů a celý proces opakovat.

Poslední část práce se zabývá popisem návrhu jednotlivých částí hlavního a příďového podvozku a její pevnostní kontroly. Kromě použitých polotovarů se zde uvádějí i jejich materiály, přičemž nejvyšší zastoupení tvoří typická ocel pro podvozky AISI 300M společně se slitinou hliníku 6063 T6. Pomocí MKP analýz v softwaru MSC Patran/Nastran byla provedena kontrola jednotlivých částí podvozku. Ve většině případů se prokázalo, že návrh je předimenzovaný. Proto je doporučeno pro snížení hmotnosti provést modifikaci použitých polotovarů. Z důvodu časové náročnosti tento proces není obsahem diplomové práce. Dále je doporučeno dbát zvýšené pozornosti při konstrukci vidlice hlavního podvozku, jelikož se pomocí MKP analýzy ukázalo kritické místo v místě svaru dvou na sebe kolmých trubek.

Výkresová dokumentace, přiložená k této práci, je detailně zhotovena pro okamžitou výrobu podvozku letounu TL-Trainer. Autor práce nebyl obeznámen s univerzálními prvky konstrukce podvozků letounů společnosti TL-Ultralight, a proto je ke zvážení zavedení výroby nových částí.

Seznam použitých zdrojů

- [1] MICHAEL NIKOLAJEVIČ, ŠULŽENKO. *Konstrukce letadel*. 2. opravené vydání. PRAHA: STÁTNÍ NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1954.
- [2] CHAPTER 13: AIRCRAFT LANDING GEAR Systems. FAA. *AVIATION MAINTENANCE TECHNICIAN HANDBOOK* [online]. 2012. s. 1-96 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/amt_airframe_vol2.pdf
- [3] *GBI* [online]. In: . [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: https://aeroweb.cz/obrazky/image/gb1_2.jpg
- [4] *OLEO TORQUE LINK MAIN LANDING GEAR* [online]. In: . [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dd/Oleo_torque_link_main_landing_gear.JPG
- [5] *SOVA* [online]. In: . [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://aeroweb.cz/Obrazky/Image/Sainer-Sova-9.jpg>
- [6] PETRÁSEK, Miloslav. *KONSTRUKCE LETADEL III: PŘÍSTÁVACÍ ZAŘÍZENÍ*. VOJENSKÁ AKADEMIE V BRNĚ, 2012.
- [7] *CERTIFIKAČNÍ SPECIFIKACE PRO LETOUNY KATEGORIE NORMÁLNÍ, CVIČNÁ, AKROBATICKÁ A PRO SBĚRNOU DOPRAVU CS-23* [online]. 2012. Evropská agentura pro bezpečnost letectví [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/file/6289/>
- [8] *TL-ULTRALIGHT: STREAM* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.tl-ultralight.cz/cs/ultralehka-letadla/stream>
- [9] ČALKOVSKÝ, Antonín a Josef PÁVEK. *Konstrukce a pevnost letadel*. 2. díl. Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1986.
- [10] PAZMANY, Ladislao. *Landing gear design for light aircraft*. San Diego, Calif.: Pazmany Aircraft, 1986. ISBN 09-616-7770-8. [online]. [cit. 2018-04-21].
- [11] KUBIENA, Jaromír. *Návrh úpravy letadla WT10 Advantic s pevným podvozkem dle předpisu CS-23* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/65976> . Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Letecký ústav. Vedoucí práce František Vaněk.
- [12] NORMAN S. CURREY. *Aircraft landing gear design: principles and practices*. 4. print. Washington, D.C: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1988. ISBN 09-304-0341-X.
- [13] STRAKOŠ, Ladislav. *Metody výpočtu olejopneumatických tlumičů a poznámky ke zkušebnímu zařízení pro jejich zkoušení*. Brno.
- [14] CHAPTER 13: AIRCRAFT LANDING GEAR SYSTEMS. FAA. *AVIATION MAINTENANCE TECHNICIAN HANDBOOK* [online]. 2012. s. 1-96 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/amt_airframe_vol2.pdf
- [15] MICHELIN. *AIRCRAFT TIRE: ENGINEERING DATA* [online]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: https://www.jupitor.co.jp/pdf/michelin_aircraft.pdf
- [16] ŠPUNDA, J. *Stavební mechanika a pevnost letounu: Požadavky pro dosažení letové způsobilosti podle pevnostních předpisů a výpočet zatížení letounu a jeho částí*. 1961

Seznam použitých zdrojů

- [17] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS, Jiří DVOŘÁČEK a František PROKEŠ. *Základy konstruování*. 4. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-750-5.
- [18] *SELF-LUBRICATED ROD END BEARINGS: RBC AEROSPACE BEARINGS* [online]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: http://www.rbcbearings.com/aero-pdfs/Plain/051_078/RE_M81935_1.pdf
- [19] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-807-3610-814.
- [20] BENEŠ, Libor. *LETECKÉ KONSTRUKČNÍ OCELI* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/OCELI.pdf>
- [21] *EHLINIK: Slitiny hliníku* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/prilohy/zakladni-technicke-informace.pdf>

Seznam použitých veličin

Seznam použitých veličin

Symbol	Název veličiny	Jednotka
m, M_{TOW}	Maximální vzletová hmotnost	kg
S	Plocha křídla	m^2
c_{sat}	Hloubka střední aerodynamické tětiny	m
d_h	Průměr hlavního kola	M
d_p	Průměr příďového kola	m
v_y	Klesací rychlost	m/s
d_l	Vertikální posun těžiště	m
d_{lk}	Stlačení pneumatik	m
d_{lt}	Pohyb os kol	m
E_k	Kinetická energie přistávacího rázu	J
E_p	Potenciální energie přistávacího rázu	J
E_c	celková energie přistávacího rázu	J
η_t	Účinnost tlumiče	-
η_k	Účinnost pneumatiky	-
R_y	Reakce od země	N
$n_{x,z}$	Provozní násobek zatížení reakcí od země	-
$n_{x,s}$	Provozní násobek setrvačných sil	-
R_{pz}	Reakce příďového podvozku ve směru z	N
R_{px}	Reakce příďového podvozku ve směru x	N
R_{py}	Reakce příďového podvozku ve směru y	N
R_{hz}	Reakce hlavního podvozku ve směru z	N
R_{hx}	Reakce hlavního podvozku ve směru x	N
R_{hy}	Reakce hlavního podvozku ve směru y	N
a	Vzdálenost mezi příďovým podvozkem a těžištěm letounu	m
b	Vzdálenost mezi hlavním podvozkem a těžištěm letounu	m
c	Vzdálenost mezi příďovým a hlavním podvozkem letounu	m
h	Výšková vzdálenost těžiště letounu od země	m
F_{hzs}	Statická provozní síla do hlavního podvozku	N
F_{hzD}	Dynamická provozní síla do hlavního podvozku	N
s_{max}	Maximální hodnota stlačení tlumiče	mm
F_t	Přepočítaná síla působící v tlumiči	N
F_k	Síla působící na pneumatiku podvozku	N
y	Vertikální přemístění osy kola	m
s	Stlačení tlumiče	m
φ	Převod pákového mechanismu	-
s_{ts}	Poloha staticky stlačeného tlumiče	mm
F_{ts}	Statická síla v tlumiči	kN
F_{tD}	Dynamická síla v tlumiči	kN
S_t	Plocha pístu	mm^2
d_t	Průměr pístu	mm
$P_s=P_2, P_1, P_3$	Jednotlivé tlaky v tlumiči	MPa
V_1, V_2, V_3	Jednotlivé objemy v tlumiči	cm^3

Seznam použitých veličin

F_v	Síla vyvolaná přetlakem vzduchu v tlumiči	N
F_T	Síla vyvolaná třením v tlumiči	N
F_t	Síla v tlumiči	N
F_0	Pracovní síla v tlumiči	N
k	Konstanta pracovního diagramu	-
E_{tl}	Tlumicí energie	J
η_{tl}	Účinnost pracovního diagramu tlumiče	-
Y_{k0}	Stlačení pneumatiky při dosažení pracovní síly tlumiče	mm
E_{k0}	Vstupní energie letounu při doteku se zemí	J
E_{kol0}	Energie převzatá jednou pneumatikou při dosažení F_0	J
E_{kol}	Energie převzatá jednou pneumatikou	J
E_{tl}	Energie převzatá tlumičem	J
t_n	Doba, za kterou tlumič urazí vzdálenost jednoho kroku (0,325 mm)	s
w_{pn}	Rychlost pístu	m/s
p_v	Tlak vzduchu v tlumiči	Pa
P_k	Tlak kapaliny v tlumiči	Pa
w_k	Rychlost proudící kapaliny v tlumiči	m/s
A_{kn}	Plocha průřezu proměnné jehly v daném kroku	mm ²
R_{kn}	Poloměr průřezu proměnné jehly v daném kroku	mm
m_{red}	Redukovaná hmotnost působící na předový podvozek	kg
φ_p	Převod sil působící na teleskopický podvozek	-
α	Úhel sklonu nohy předového podvozku	°
M_{oy}	Ohybový moment kolem osy y	Nmm
M_{oz}	Ohybový moment kolem osy z	Nmm
M_k	Kroutící moment	Nmm
W_o	Modul průřezu v ohybu	mm ³
R_m	Mez pevnosti použitého materiálu	MPa
$R_{p,02}$	Mez kluzu použitého materiálu	MPa
ρ	Hustota	kg/m ³
σ_t	Napětí v tlaku	MPa
σ_{oy}	Napětí v ohybu kolem osy y	MPa
σ_{oz}	Napětí v ohybu kolem osy z	MPa
τ_k	Napětí v krutu	MPa
σ_{red}	Redukované napětí	MPa
q	Spojité zatížení	N/mm

Seznam obrázků

Obrázek 1 GB1 s pružinovým podvozkem [3]	8
Obrázek 2 Teleskopický podvozek s nůžkovým mechanismem [4]	9
Obrázek 3 Pákový podvozek [5]	9
Obrázek 4 TL-ULTRALIGHT Stream	12
Obrázek 5 2D pohled letounu Stream	12
Obrázek 6 Původní přistávací zařízení	13
Obrázek 7 Kontrola vzdálenosti vrtule od země při staticky stlačeném podvozku	14
Obrázek 8 Kontrola vzdálenosti vrtule od země při prázdné pneumatice a naplno stlačeném příd'ovém tlumiči	15
Obrázek 9 Výsledný 3D návrh podvozku	15
Obrázek 10 Vodorovné přistání se skloněnými reakcemi	18
Obrázek 11 Reakce při vodorovném přistání s příd'ovým kolem těsně nad zemí	19
Obrázek 12 Reakce při přistání s velkým úhlem podélného sklonu	20
Obrázek 13 Reakce při bočním zatížení při přistání	20
Obrázek 14 Reakce podvozku při brždění	21
Obrázek 15 Reakce při statickém zatížení podvozku	22
Obrázek 16 Geometrie pákového mechanismu	24
Obrázek 17 Závislost stlačení tlumiče na silách vyvolaných přetlakem vzduchu v tlumiči (F_v) a třením v ucpávkách (F_T)	26
Obrázek 18 Pracovní diagram tlumiče	27
Obrázek 19 Závislost stlačení tlumiče na rychlosti klesání těžiště letounu	30
Obrázek 20 Geometrie jehly tlumiče (světle naznačen konstantní otvor v polopropustné podložce)	31
Obrázek 21 Pracovní diagram tlumiče	33
Obrázek 22 Geometrie jehly tlumiče (světle naznačen konstantní otvor v polopropustné podložce)	33
Obrázek 23 Sestava hlavního podvozku	34
Obrázek 24 Noha hlavní podvozku	34
Obrázek 25 Vidlice hlavního podvozku	35
Obrázek 26 Tlumič hlavního podvozku	36
Obrázek 27 Závěs tlumiče hlavního podvozku	37
Obrázek 28 Sestava příd'ového podvozku	38
Obrázek 29 Noha příd'ového podvozku	38
Obrázek 30 Tlumič příd'ového podvozku	39
Obrázek 31 Nůžky podvozku	40
Obrázek 32 Síť vidlice v programu MSC Patran	41
Obrázek 33 Výsledek nelineární analýzy vidlice	42
Obrázek 34 Zobrazení místa kontrolovaného řezu	42
Obrázek 35 Síť sestavy v programu MSC Patran	43
Obrázek 36 Výsledek nelineární analýzy sestavy	44
Obrázek 37 Síť závěsu v programu MSC Patran	44
Obrázek 38 Výsledek nelineární analýzy závěsu	45
Obrázek 39 Síť unašeče v programu MSC Patran	45
Obrázek 40 Výsledek lineární analýzy unašeče	46
Obrázek 41 Síť těla tlumiče v programu MSC Patran	46
Obrázek 42 Výsledek lineární analýzy těla tlumiče	47

Seznam obrázků

Obrázek 43 Sít' pístní tyče tlumiče v programu MSC Patran	47
Obrázek 44 Výsledek lineární analýzy pístní tyče tlumiče.....	48
Obrázek 45 Oka vidlice pro spojení s kloubovou hlavicí tlumiče	48
Obrázek 46 Spoj vidlice s nohou hlavního podvozku	49
Obrázek 47 Sít' sestavy příďového podvozku programu MSC Patran	51
Obrázek 48 Výsledek lineární analýzy sestavy příďového podvozku	51
Obrázek 49 Statická analýza příďového podvozku	52
Obrázek 50 Spoj příďového podvozku s konstrukcí letounu	52

Seznam tabulek

Tabulka 1 Základní parametry letounu Stream.....	12
Tabulka 2 Základní parametry původního přistávacího zařízení.....	13
Tabulka 3 Navrhované základní parametry přistávacího zařízení.....	14
Tabulka 4 Výsledné síly pro případ vodorovného přistání se skloněnými reakcemi	18
Tabulka 5 Výsledné reakce pro případ vodorovného přistání s příďovým kolem těsně nad zemí.....	19
Tabulka 6 Výsledné reakce pro případ přistání s velkým úhlem podélného sklonu	20
Tabulka 7 Výsledné reakce pro případ bočního zatížení podvozku při přistání	20
Tabulka 8 Výsledné reakce pro případ zatížení podvozku při brzdění.....	21
Tabulka 9 Výsledné reakce pro případ statického zatížení podvozku při maximální a minimální hmotnosti letounu	22
Tabulka 10 Výsledné reakce pro dodatečné zatížení příďového podvozku	23
Tabulka 11 Souhrn všech případ zatížení hlavního podvozku	23
Tabulka 12 Souhrn všech případ zatížení příďového podvozku	23
Tabulka 13 Vstupní parametry pro návrh tlumiče hlavního podvozku	24
Tabulka 14 Základní parametry navrženého tlumiče	25
Tabulka 15 Výsledné hodnoty tlaků a objemů v průběhu stlačování tlumiče	26
Tabulka 16 Síly v tlumiči.....	27
Tabulka 17 Energetické vlastnosti tlumiče	28
Tabulka 18 Energetické vlastnosti pneumatiky	28
Tabulka 19 Vstupní parametry pro návrh tlumiče příďového podvozku	32
Tabulka 20 Výsledné hodnoty tlaků a objemů v průběhu stlačování tlumiče	32
Tabulka 21 Energetické vlastnosti tlumiče	33
Tabulka 22 Použité materiály pro výrobu podvozkové nohy	35
Tabulka 23 Použité materiály pro výrobu vidlice.....	35
Tabulka 24 Použité materiály pro výrobu tlumiče hlavního podvozku.....	36
Tabulka 25 Použité materiály pro výrobu závěsu tlumiče hlavního podvozku	37
Tabulka 26 Použité materiály pro výrobu nohy příďového podvozku	39
Tabulka 27 Použité materiály pro výrobu tlumiče příďového podvozku	40
Tabulka 28 Použité materiály pro výrobu nůžek podvozku	40
Tabulka 29 Provozní síly v místě působení na ose kola	41
Tabulka 30 Materiálové charakteristiky oceli AISI 300M	41
Tabulka 31 Vstupní parametry pro numerickou kontrolu.....	42
Tabulka 32 Materiálové charakteristiky slitiny hliníku 7075 T6.....	45
Tabulka 33 Materiálové charakteristiky slitiny hliníku 6063 T6.....	46
Tabulka 34 Vstupní hodnoty pro výpočet pevnostní kontroly čepu tlumiče	48
Tabulka 35 Vstupní hodnoty pro výpočet pevnostní kontroly čepu spoje nohy a vidlice	49
Tabulka 36 Výsledné reakce ve spodním uložení	52
Tabulka 37 Vstupní hodnoty pro výpočet pevnostní kontroly čepu spoje podvozku a konstrukce letounu	53

Seznam příloh

Příloha A	MKP analýza hlavního podvozku pro veškeré případy zatížení
Příloha B	MKP analýza příďového podvozku pro veškeré případy zatížení
Příloha C	MKP analýza vidlice hlavního podvozku pro veškeré případy zatížení
Příloha D	Souřadnice geometrie jehel hlavního a příďového tlumiče
Příloha	Výkresová dokumentace

Příloha A

Vodorovné přistání se skloněnými reakcemi

Patran 2014.1 64-Bit 28-Apr-18 20:34:22

Fringe: Default, A2:Non-linear: 100. % of Load, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



Přistání s velkým úhlem podélného sklonu

Patran 2014.1 64-Bit 28-Apr-18 20:43:00

Fringe: Default, A3:Non-linear: 100. % of Load, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



Boční zatížení podvozku při přistání I

Patran 2014.1 64-Bit 28-Apr-18 21:26:20

Fringe: Default, A1:Non-linear: 100. % of Load, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)

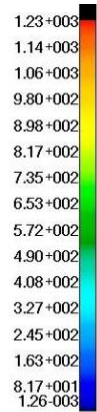
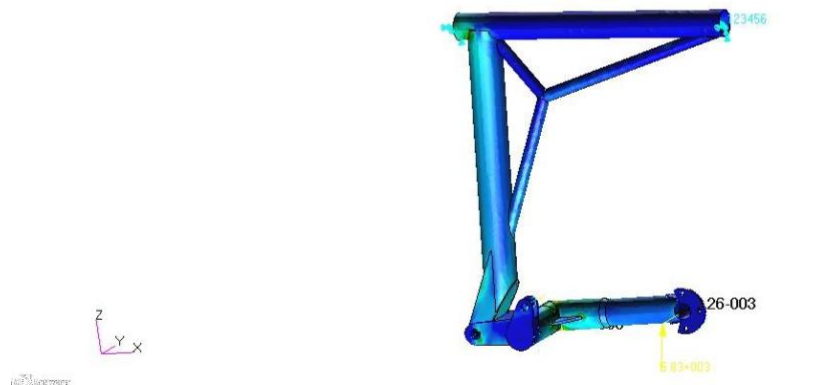


Příloha A

Boční zatížení podvozku při přistání II

Patran 2014.1 64-Bit 28-Apr-18 21:36:01

Fringe: Default, A2:Non-linear: 100. % of Load, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)

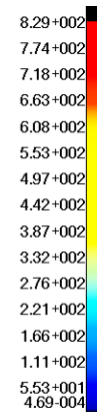
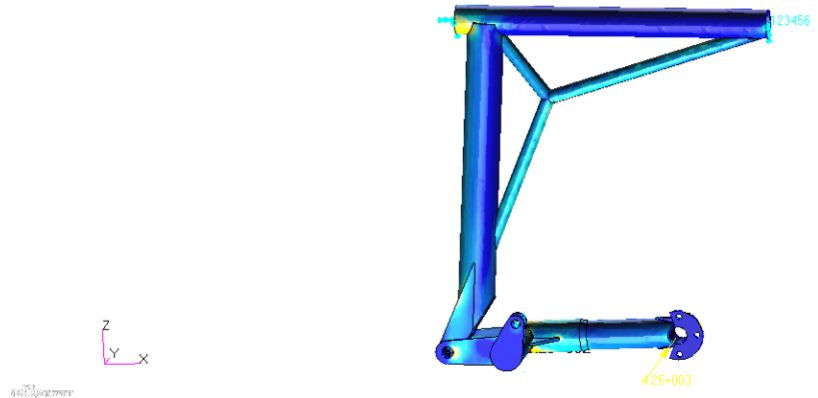


default_Fringe :
Max 1.23+003 @Nd 60924
Min 1.26-003 @Nd 58229

Zatížení podvozku při brždění

Patran 2014.1 64-Bit 28-Apr-18 20:53:58

Fringe: Default, A5:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



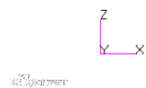
default_Fringe :
Max 8.29+002 @Nd 61610
Min 4.69-004 @Nd 16244

Příloha B

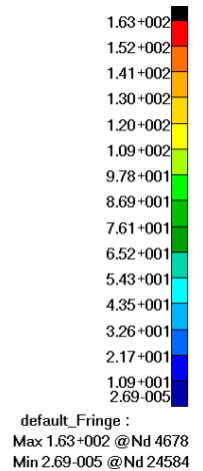
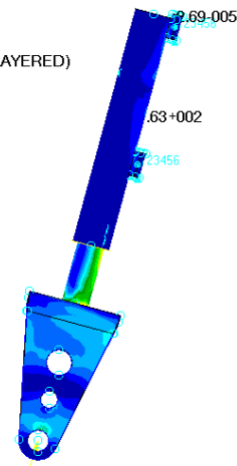
Vodorovné přistání se skloněnými reakcemi

Patran 2014.1 64-Bit 12-Apr-18 23:31:09

Fringe: Default, A2:Non-linear: 100. % of Load, Nonlinear Stresses, Stress Tensor, von Mises, (NON-LAYERED)



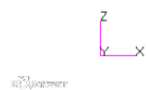
Patran



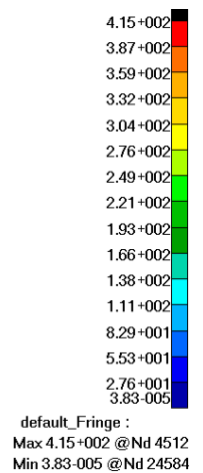
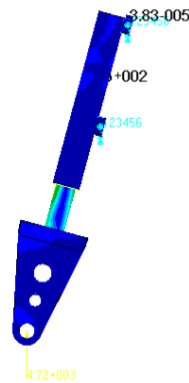
Zatížení podvozku při brždění

Patran 2014.1 64-Bit 15-Apr-18 17:38:30

Fringe: Default, A4:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



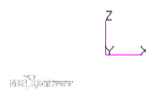
Patran



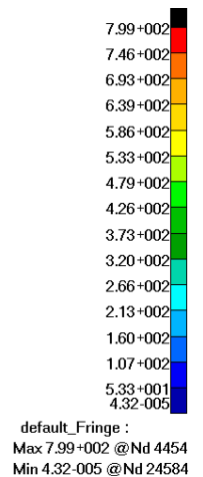
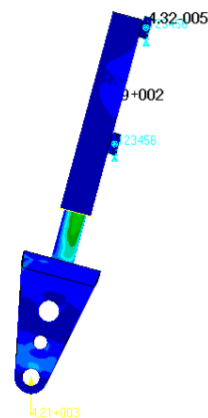
Dodatečné podmínky-a

Patran 2014.1 64-Bit 13-Apr-18 09:25:25

Fringe: Default, A3:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



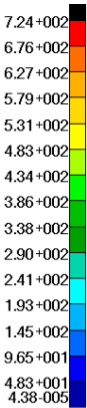
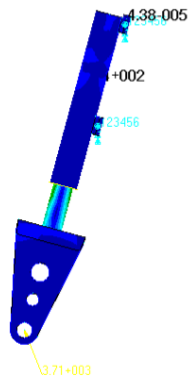
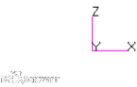
Patran



Příloha B

Dodatečné podmínky-b

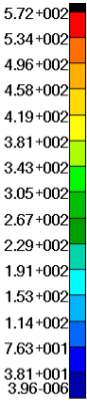
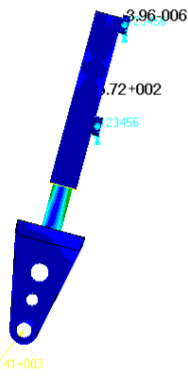
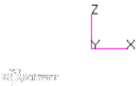
Patran 2014.1 64-Bit 15-Apr-18 17:55:58
Fringe: Default, A5:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



default_Fringe :
Max 7.24+002 @Nd 4512
Min 4.38-005 @Nd 24584

Dodatečné podmínky-c

Patran 2014.1 64-Bit 15-Apr-18 18:12:50
Fringe: Default, A7:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



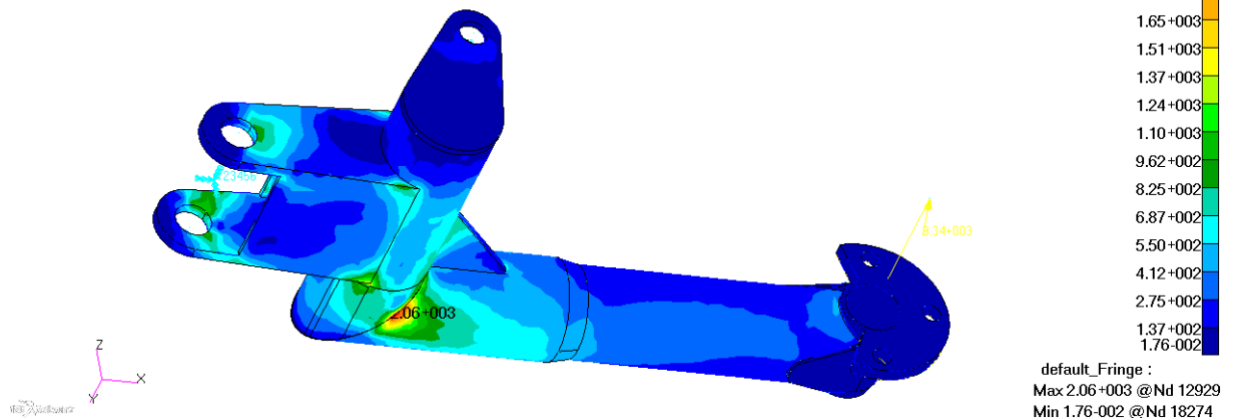
default_Fringe :
Max 5.72+002 @Nd 4678
Min 3.96-006 @Nd 24584

Příloha C

Vodorovné přistání se skloněnými reakcemi

Patran 2014.1 64-Bit 29-Apr-18 17:56:26

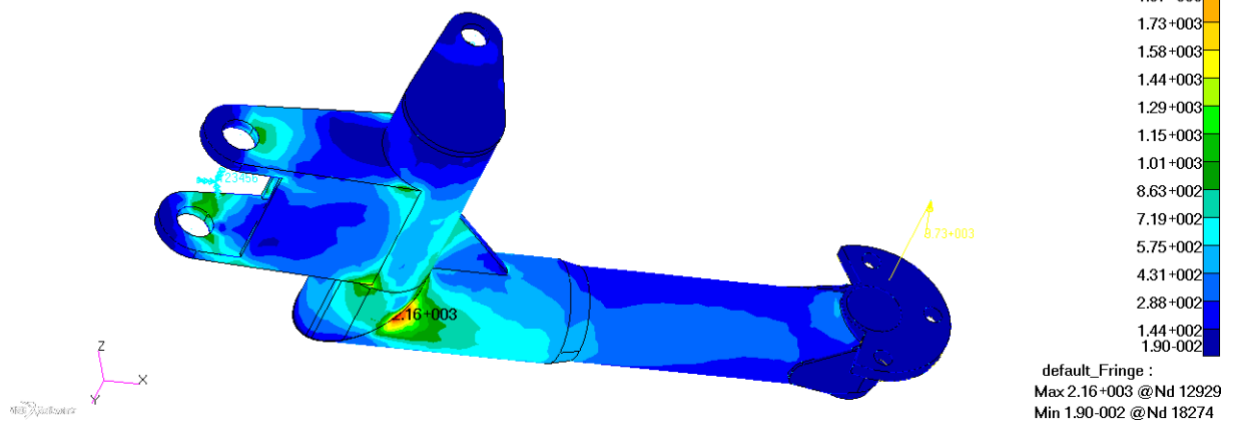
Fringe: Default, A5:Non-linear: 100. % of Load, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



Přistání s velkým úhlem podélného sklonu

Patran 2014.1 64-Bit 29-Apr-18 18:10:43

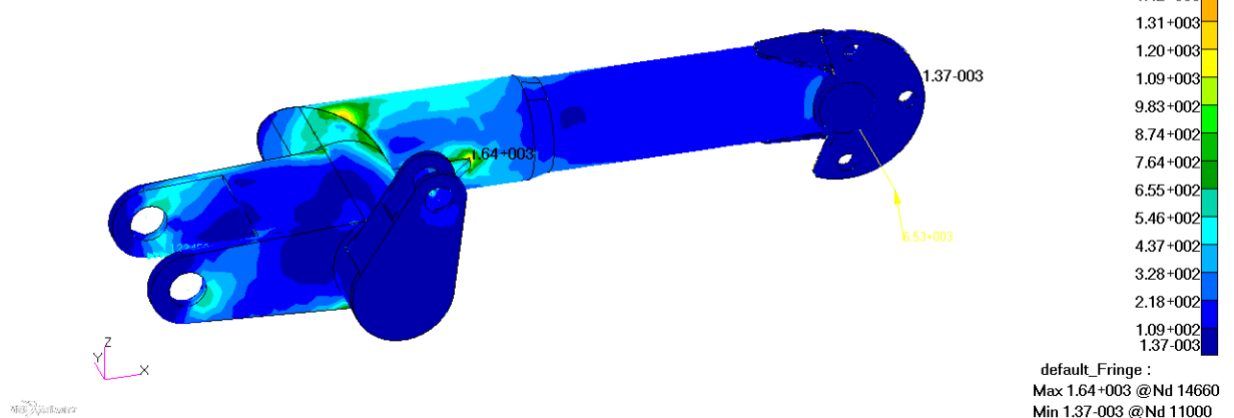
Fringe: Default, A6:Non-linear: 100. % of Load, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



Boční zatížení podvozku při přistání I

Patran 2014.1 64-Bit 29-Apr-18 17:23:46

Fringe: Default, A1:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)

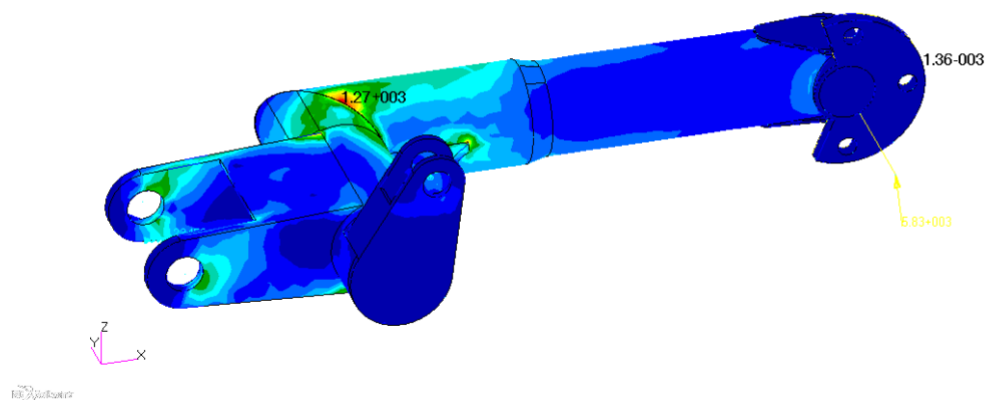


Příloha C

Boční zatížení podvozku při přistání II

Patran 2014.1 64-Bit 29-Apr-18 17:29:02

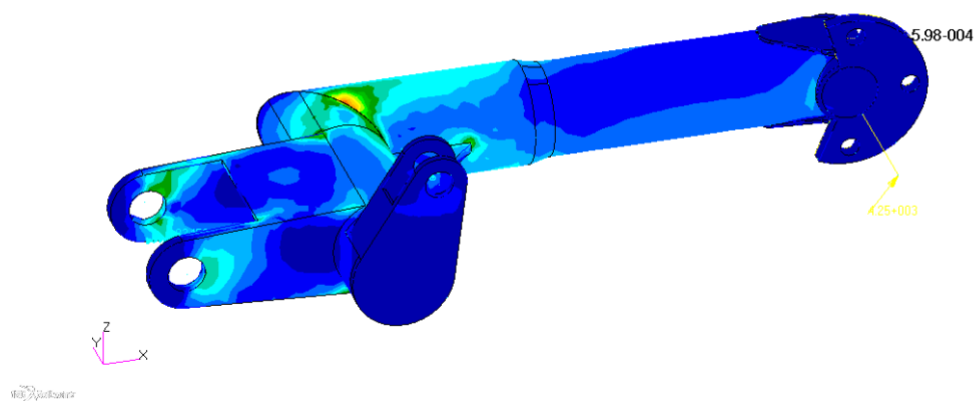
Fringe: Default, A2:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



Zatížení podvozku při brždění

Patran 2014.1 64-Bit 29-Apr-18 17:32:07

Fringe: Default, A3:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)



Příloha D

Jehla příďového podvozku				Jehla hlavního podvozku			
1. část		2. část		1. část		2. část	
Y[mm]	X[mm]	Y[mm]	X[mm]	Y[mm]	X[mm]	Y[mm]	X[mm]
0	5,000	19	2,111	0	4,000	19,5	2,200
0,5	2,711	19,5	2,116	0,5	2,223	20	2,208
1	2,535	20	2,121	1	2,140	20,5	2,215
1,5	2,425	20,5	2,126	1,5	2,095	21	2,222
2	2,349	21	2,131	2	2,068	21,5	2,229
2,5	2,292	21,5	2,136	2,5	2,051	22	2,237
3	2,248	22	2,141	3	2,041	22,5	2,244
3,5	2,213	22,5	2,147	3,5	2,034	23	2,252
4	2,186	23	2,153	4	2,031	23,5	2,259
4,5	2,163	23,5	2,158	4,5	2,029	24	2,266
5	2,145	24	2,164	5	2,029	24,5	2,274
5,5	2,129	24,5	2,170	5,5	2,031	25	2,281
6	2,117	25	2,177	6	2,033	25,5	2,289
6,5	2,106	25,5	2,183	6,5	2,036	26	2,296
7	2,098	26	2,189	7	2,040	26,5	2,304
7,5	2,090	26,5	2,196	7,5	2,045	27	2,311
8	2,085	27	2,202	8	2,049	27,5	2,319
8,5	2,080	27,5	2,209	8,5	2,054	28	2,326
9	2,076	28	2,216	9	2,060	28,5	2,334
9,5	2,074	28,5	2,223	9,5	2,065	29	2,341
10	2,072	29	2,230	10	2,071	29,5	2,349
10,5	2,071	29,5	2,237	10,5	2,077	30	2,357
11	2,070	30	2,244	11	2,084	30,5	2,364
11,5	2,070	30,5	2,252	11,5	2,090	31	2,372
12	2,070	31	2,259	12	2,096	31,5	2,380
12,5	2,071	31,5	2,267	12,5	2,103	32	2,387
13	2,073	32	2,274	13	2,109	32,5	2,395
13,5	2,074	32,5	2,282	13,5	2,116	33	2,403
14	2,076	33	2,290	14	2,123	33,5	2,411
14,5	2,079	33,5	2,298	14,5	2,130	34	2,419
15	2,081	34	2,306	15	2,137	34,5	2,427
15,5	2,084	34,5	2,314	15,5	2,144	35	2,434
16	2,087	35	2,323	16	2,151	35,5	2,442
16,5	2,091	35,5	2,331	16,5	2,158	36	2,450
17	2,095	36	2,340	17	2,165	36,5	2,458
17,5	2,098	36,5	2,348	17,5	2,172	37	2,466
18	2,103	37	2,357	18	2,179	37,5	2,475
18,5	2,107	37,5	2,366	18,5	2,186	38	2,483

Příloha D

38,5	2,384	54,5	2,762	38,5	2,491	54,5	2,792
39	2,393	55	2,778	39	2,499	55	2,803
39,5	2,403	55,5	2,794	39,5	2,507	55,5	2,815
40	2,412	56	2,811	40	2,516	56	2,827
40,5	2,422	56,5	2,828	40,5	2,524	56,5	2,839
41	2,431	57	2,845	41	2,532	57	2,852
41,5	2,441	57,5	2,863	41,5	2,541	57,5	2,865
42	2,451	58	2,882	42	2,549	58	2,878
42,5	2,461	58,5	2,901	42,5	2,558	58,5	2,892
43	2,472	59	2,920	43	2,567	59	2,907
43,5	2,482	59,5	2,941	43,5	2,575	59,5	2,922
44	2,493	60	2,962	44	2,584	60	2,937
44,5	2,504	60,5	2,984	44,5	2,593	60,5	2,954
45	2,515	61	3,007	45	2,602	61	2,971
45,5	2,526	61,5	3,031	45,5	2,611	61,5	2,991
46	2,537	62	3,055	46	2,620	62	3,012
46,5	2,548	62,5	3,082	46,5	2,629	62,5	3,037
47	2,560	63	3,109	47	2,638	63	3,068
47,5	2,572	63,5	3,138	47,5	2,648	63,5	3,116
48	2,584	64	3,170	48	2,657	64	3,235
48,5	2,596	64,5	3,203	48,5	2,667	64,5	3,468
49	2,609	65	3,239	49	2,676	65	3,500
49,5	2,621	65,5	3,278	49,5	2,686		
50	2,634	66	3,322	50	2,696		
50,5	2,647	66,5	3,371	50,5	2,706		
51	2,661	67	3,427	51	2,716		
51,5	2,674	67,5	3,494	51,5	2,726		
52	2,688	68	3,578	52	2,737		
52,5	2,702	68,5	3,690	52,5	2,747		
53	2,717	69	3,868	53	2,758		
53,5	2,731	69,5	4,281	53,5	2,769		
54	2,747	70	5,000	54	2,780		
